ANSYS
在材料工程中的应用

胡红军　黄伟九　杨明波　编著



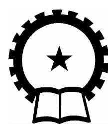
机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

VISIT…

LANZAROTE Caliente.com

ANSYS 在材料工程中的应用

胡红军　黄伟九　杨明波　编著



机 械 工 业 出 版 社

本书结合基本物理场数值模拟的理论基础与大量实例，全面系统地介绍了材料工程中基于 ANSYS 的数值模拟技术，包括铸造、焊接、板料成形、体积成形、轧制成形、热处理、失效分析、复合材料设计等领域，涉及温度场、应力场、流场、电磁场的多场耦合的数值模拟与应用。

本书将材料工程中的计算机模拟理论与实践相结合，使读者在学习 ANSYS 软件的同时，可以不断提高专业领域的理论修养。为了便于练习，本书在每章后提供了习题，可以通过改变问题的求解条件，分析评价计算结果的正确性和准确性，以达到举一反三的目的。

本书可作为高等院校相关专业本科生和研究生以及教师学习 ANSYS 软件的教材，也可以供从事材料科学与工程分析和设计的相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS 在材料工程中的应用/胡红军，黄伟九，杨明波编著. —北京：机械工业出版社，2012.12

ISBN 978-7-111-40289-3

Ⅰ. ①A… Ⅱ. ①胡… ②黄…③杨… Ⅲ. ①材料科学—有限元分析—应用程序 Ⅳ. ①TB3②O241.82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 311890 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑：孔 劲 责任编辑：孔 劲 杨明远 版式设计：霍永明
责任校对：陈立辉 封面设计：姚 毅 责任印制：乔 宇
北京铭成印刷有限公司印刷
2013 年 2 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 19.25 印张 · 484 千字
0001—3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-40289-3
定价：48.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务	网络服务
	策划编辑：(010)88379772
社服务中心：(010)88361066	教材网：http://www.cmpedu.com
销售一部：(010)68326294	机工官网：http://www.cmpbook.com
销售二部：(010)88379649	机工官博：http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线：(010)88379203	**封面无防伪标均为盗版**

前　　言

ANSYS 软件是目前应用最广的有限元软件之一，其用户遍布世界各国。该软件从 20 世纪 90 年代进入中国，目前在国内的用户多达 5000 余家，遍及机械制造、航空航天、汽车、铁道、石油化工、能源等行业。当前，许多介绍 ANSYS 等有限元软件的书籍是从软件应用的角度出发，主要介绍软件命令的操作规则，很少介绍工程的背景知识和有限元相关的概念，这使得有限元知识欠缺的读者只知仿照书中提供的例题进行类似问题的分析。为此，本书从有限元在材料工程中的实际应用出发，结合专业基础理论利用 ANSYS 软件分析问题，使读者能在较短的时间内，既知其然，又知其所以然，真正掌握有限元的分析方法，并在工程实际中灵活运用。

本书简要介绍了 ANSYS 软件在一些物理场中的应用理论及操作步骤，全面系统地阐述了 ANSYS 软件在材料科学与工程中的应用，内容由浅入深，循序渐进。全书共分 13 章，第 1 章 ~ 第 5 章结合详细的实例和操作步骤分别介绍了 ANSYS 软件在材料科学与工程的温度场、应力场、流场、电磁场以及耦合场等方面的基础知识。第 6 章 ~ 第 13 章分别介绍了 ANSYS 软件在板料成形、体积成形、轧制成形、焊接、热处理、材料工程失效分析、复合材料设计、铸造方面应用的理论和实际操作。书中每章都配有例题，同时，为配合读者的学习，还编写了一定数量的练习题。

本书可作为理工科特别是材料科学与工程学科高等院校高年级本科生、研究生及教师学习使用 ANSYS 软件的教材和参考书，也可供工程技术人员参考。

本书在编写中参考了国内外出版的一些书籍以及网络资料，在此特向作者致谢。本书收录了国家自然科学基金青年基金（51101176）和国家自然科学基金（50975302）的相关研究内容，在此向国家自然科学基金委员会表示感谢。

由于篇幅所限，未能将 ANSYS 软件在材料工程中的应用全部包括进来，还有相当大的补充空间。鉴于作者水平所限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编　者

目　　录

前言
第 1 章　基于 ANSYS 软件的温度场数值模拟 …… 1
1.1　温度场的基本理论与 ANSYS 基础 …… 1
1.2　ANSYS 软件在温度场模拟中的应用实例 …… 7
1.3　本章总结 …… 21
1.4　练习题 …… 22
第 2 章　基于 ANSYS 软件的应力场数值模拟 …… 27
2.1　应力场的基本理论及 ANSYS 应用基础 …… 27
2.2　ANSYS 软件在应力场模拟中的应用实例 …… 29
2.3　本章总结 …… 52
2.4　练习题 …… 52
第 3 章　基于 ANSYS 软件的流场数值模拟 …… 57
3.1　流场的基本理论与 FLOTRAN CFD 基本知识 …… 57
3.2　ANSYS 软件的流体动力学分析实例 …… 60
3.3　本章总结 …… 71
3.4　练习题 …… 71
第 4 章　基于 ANSYS 软件的电磁场数值模拟 …… 73
4.1　电磁场分析基本理论与 ANSYS 电磁场分析的基本知识 …… 73
4.2　ANSYS 软件在电磁场模拟中的应用实例 …… 77
4.3　本章总结 …… 92
4.4　练习题 …… 92
第 5 章　基于 ANSYS 软件的耦合场数值模拟 …… 94
5.1　耦合场分析的基本理论与操作 …… 94
5.2　ANSYS 软件在耦合场模拟中的应用实例 …… 96
5.3　本章总结 …… 122
5.4　练习题 …… 122
第 6 章　基于 ANSYS 软件的板料成形数值模拟 …… 126
6.1　板料成形过程数值模拟基本理论 …… 126
6.2　ANSYS 软件在板料成形模拟中的应用实例 …… 128
6.3　本章总结 …… 154
6.4　练习题 …… 154
第 7 章　基于 ANSYS 软件的体积成形数值模拟 …… 155
7.1　体积成形工艺及 ANSYS 非线性接触技术 …… 155
7.2　ANSYS 软件在体积成形模拟中的应用实例 …… 157

7.3 本章总结 …… 173
7.4 练习题 …… 173
第 8 章 基于 ANSYS 软件的轧制成形数值模拟 …… 174
8.1 轧制成形的基本理论 …… 174
8.2 ANSYS 软件在轧制成形模拟中的应用实例 …… 174
8.3 本章总结 …… 189
8.4 练习题 …… 189
第 9 章 基于 ANSYS 软件的焊接过程数值模拟 …… 190
9.1 焊接过程模拟的基本理论及 ANSYS 软件模拟基础 …… 190
9.2 ANSYS 软件在焊接工艺模拟中的应用实例 …… 191
9.3 本章总结 …… 220
9.4 练习题 …… 220
第 10 章 基于 ANSYS 软件的热处理过程数值模拟 …… 223
10.1 热处理工艺及计算机模拟 …… 223
10.2 ANSYS 软件在热处理工艺模拟中的应用实例 …… 224
10.3 本章总结 …… 236
10.4 练习题 …… 236
第 11 章 基于 ANSYS 软件的材料工程失效分析数值模拟 …… 240
11.1 基于 ANSYS 失效分析基础 …… 240
11.2 ANSYS 软件在材料工程疲劳分析模拟中的应用实例 …… 243
11.3 本章总结 …… 266
11.4 练习题 …… 266
第 12 章 基于 ANSYS 软件的复合材料数值模拟 …… 268
12.1 复合材料设计的基本理论与 ANSYS 有限元方法 …… 268
12.2 ANSYS 软件在复合材料设计上的应用实例 …… 270
12.3 本章总结 …… 281
12.4 练习题 …… 281
第 13 章 基于 ANSYS 软件的铸造成形数值模拟 …… 283
13.1 铸件凝固过程数值模拟概况 …… 283
13.2 ANSYS 软件在铸造过程模拟中的应用实例 …… 284
13.3 本章总结 …… 303
13.4 练习题 …… 303
附录 …… 305
参考文献 …… 307

第 1 章　基于 ANSYS 软件的温度场数值模拟

1.1　温度场的基本理论与 ANSYS 基础

在材料的加工、成形过程中常常会遇到与温度场有关的问题，如金属材料的热加工、高分子材料的成型以及陶瓷材料的烧结等。这些问题的温度场分析对材料工艺的研究、工艺质量的提高和工艺过程的控制，相变过程和机理的研究，节能以及新技术的开发和应用非常重要。但这些过程常伴随相变潜热的释放、复杂的边界条件等，所以很难得到温度场分布的解析解，只能采用各种数值计算方法进行求解。因此，应用计算机技术解决传热问题已成为材料科学与工程技术发展中的重要课题。

温度场是指在各个时刻物体内各点温度分布的总称。由傅里叶定律知：物体导热热流量与温度变化率有关，所以研究物体导热必涉及物体的温度分布。一般来说，物体的温度分布是坐标和时间的函数。即：$T=f(x,y,z,t)$，其中 x、y、z 为空间坐标，t 为时间坐标。

根据能量守恒定律与傅里叶定律，建立导热物体中的温度场应满足的数学表达式

$$\frac{\rho c\partial(T)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q \tag{1-1}$$

式中，ρ 是材料的密度（kg/m^3）；c 是材料的比热容（J/(kg·K)）；t 是时间(s)；λ_x、λ_y、λ_z 分别是材料沿 x、y、z 方向的热导率(W/(m·K))；$Q=Q(x,y,z,t)$是材料内部的热源密度(W/kg)。

式(1-1)称为导热微分方程，是笛卡儿坐标系中三维非稳态导热微分方程的一般表达式，它是目前温度场数值模拟中普遍使用的描述方程，不仅适用于固体，也适用于流体。

通过导热微分方程可知，求解导热问题，实际上就是求解导热微分方程。预知某一导热问题的温度分布，必须给出表征该问题的附加条件。导热微分方程的定解条件是指使导热微分方程获得适合某一特定导热问题的求解的附加条件。

（1）初始条件　初始条件是指求解问题的初始温度场也就是在零时刻温度场的分布。它可以是均匀的，此时有$T|_{t=0}=T_0$，也可以是不均匀的，各点的温度值已知或者遵从以下关系式。

$$T|_{t=0}=T_0(x,y,z) \tag{1-2}$$

（2）边界条件：边界条件是指物体表面或者边界与周围环境的热交换情况，通常有三类重要的边界条件。不同边界条件下的导热情况及表达式。

1）第一类边界条件，第一类边界条件是指物体边界上的温度分布函数为已知，表示为

$$T|_s=T_w \text{ 或 } T|_s=T_w(x,y,z,t) \tag{1-3}$$

2）第二类边界条件，第二类边界条件是指边界上的热流密度已知，表示为

$$q|_s=-\lambda\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_s=q_w \text{ 或 } q|_s=-\lambda\left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_s=q_w(x,y,z,t) \tag{1-4}$$

式中，n 为物体边界的外法线方向，并规定热流密度的方向与边界的外法线方向相同。

3）第三类边界条件。第三类边界条件又称为对流边界条件，是指物体与其周围环境介质间的表面传热系数 k 和介质的温度 t_f 已知，表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n}=k(T-t_f) \tag{1-5}$$

稳态温度场是指在稳态条件下物体各点的温度分布不随时间的改变而变化的温度场，其表达式为 $T=f(x,y,z)$。

在分析稳态热传导问题时，不需要考虑物体的初始温度分布对最后的稳定温度场的影响，因此不必考虑温度场的初始条件，而只需考虑换热边界条件。计算稳态温度场实际上是求解偏微分方程的边值问题。由于实际工程问题中的换热边界条件比较复杂，在许多场合下也很难进行测量，如何定义正确的换热边界条件是温度场计算的一个难点。

如果系统的净热流率为0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量：$q_{流入}+q_{生成}-q_{流出}=0$，则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。稳态热分析的能量平衡方程为(以矩阵形式表示)

$$[\boldsymbol{K}]\{\boldsymbol{T}\}=\{\boldsymbol{Q}\} \tag{1-6}$$

式中，$[\boldsymbol{K}]$是传导矩阵，包含热导率、对流系数及辐射率和形状系数；$\{\boldsymbol{T}\}$是节点温度向量；$\{\boldsymbol{Q}\}$是节点热流率向量，包含热生成。ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件，生成$[\boldsymbol{K}]$、$\{\boldsymbol{T}\}$以及$\{\boldsymbol{Q}\}$。

稳态传热用于分析稳定的热载荷对系统或部件的影响。通常在进行瞬态热分析以前，用稳态热分析确定初始温度分布。稳态热分析可以通过有限元计算确定由于稳定的热载荷引起的温度、热梯度、热流率、热流密度等参数。

在 ANSYS 中，温度场的模拟主要是应用在热分析模块。热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，例如热量的获取或损失、热梯度、热流密度(热通量)等。热分析在许多工程应用中扮演重要角色，例如内燃机、涡轮机、换热器、管路系统、电子元件等。在 ANSYS/Multiphysics、ANSYS/Mechanical、ANSYS/Thermal、ANSYS/FLOTRAN、ANSYS/ED 五种产品中包含热分析功能，其中 ANSYS/FLOTRAN 不含相变热分析。ANSYS 热分析基于能量守恒定律的热平衡方程，用有限元法计算各节点的温度，并导出其他热物理参数。ANSYS 热分析包括热传导、热对流及热辐射三种热传递方式。此外，还可以分析相变、有内热源、接触热阻等问题。ANSYS 热分析分为①稳态传热：系统的温度场不随时间变化；②瞬态传热：系统的温度场随时间明显变化；③耦合分析：有热—结构耦合、热—流体耦合、热—电耦合、热—磁耦合、热—电—磁—结构耦合等。

1.1.1 稳态传热分析

如果系统的净热流率为0，即流入系统的热量加上系统自身产生的热量等于流出系统的热量：$q_{流入}+q_{生成}-q_{流出}=0$，则系统处于热稳态。在稳态热分析中任一节点的温度不随时间变化。

1. 稳态热分析的单元

热分析涉及的单元大约有40种，其中纯粹用于热分析的有14种：

线性单元： LINK32 二维二节点热传导单元

	LINK33	三维二节点热传导单元
	LINK34	二节点热对流单元
	LINK31	二节点热辐射单元
二维实体单元：	PLANE55	四节点四边形单元
	PLANE77	八节点四边形单元
	PLANE35	三节点三角形单元
	PLANE75	四节点轴对称单元
	PLANE78	八节点轴对称单元
三维实体单元：	SOLID87	六节点四面体单元
	SOLID70	八节点六面体单元
	SOLID90	二十节点六面体单元
壳单元：	SHELL57	四节点
点单元：	MASS71	

2. ANSYS 稳态热分析的基本过程

（1）建模

1）确定 jobname、title、unit。

2）进入 PREP7 前处理，定义单元类型，设定单元选项。

3）定义单元实常数。

4）定义材料热性能参数，对于稳态传热，一般只需定义热导率，其它可以是恒定的，也可以随温度变化。

（2）施加载荷计算

1）定义分析类型。如果进行新的热分析：命令：ANTYPE，STATIC，NEW；如果继续上一次分析，比如增加边界条件等：命令：ANTYPE，STATIC，REST。

2）施加载荷，可以直接在实体模型或单元模型上施加以下五种载荷(边界条件)。

① 恒定的温度。通常作为自由度约束施加于已知的边界上。命令：D。

② 热流率。热流率作为节点集中载荷，主要用于线单元模型中(通常线单元模型不能施加对流或热流密度载荷)，如果输入的值为正，代表热流流入节点，即单元获取热量。如果温度与热流率同时施加在一节点上，则 ANSYS 读取温度值进行计算。命令：F。

注意：如果在实体单元的某一节点上施加热流率，则此节点周围的单元要密一些，在两种热导率差别很大的两个单元的公共节点上施加热流率时，尤其要注意。此外，尽可能使用热生成或热流密度边界条件，这样结果会更精确些。

③ 对流。对流边界条件作为面载荷施加于实体的外表面，计算与流体的热交换，它仅可施加于实体和壳模型上。命令：SF。

④ 热流密度。热流密度也是一种面载荷。当通过单位面积的热流率已知或通过 FLOTRAN CFD 计算得到时，可以在模型相应的外表面施加热流密度。如果输入的值为正，代表热流流入单元。热流密度也仅适用于实体和壳单元。热流密度与对流可以施加在同一外表面，但 ANSYS 仅读取最后施加的面载荷进行计算。命令：F。

⑤ 生热率。生热率作为体载荷施加于单元上，可以模拟化学反应生热或电流生热。它的单位是单位体积的热流率。命令：BF。

3）确定载荷步选项。

① 普通选项。

时间选项：虽然对于稳态热分析时间选项并没有实际的物理意义，但它提供了一个方便的设置载荷步和载荷子步的方法。命令：TIME。

每载荷步中子步的数量或时间步大小：对于非线性分析，每一载荷步需要多个子步。命令：NSUBST 或 DELTIM。

递进或阶跃选项：如果定义阶跃（stepped）选项，载荷值在这个载荷步内保持不变；如果为递进（ramped）选项，则载荷值由上一载荷步值到本载荷步值随每一子步线性变化。命令：KBC。

② 非线性选项。

迭代次数：本选项设置每一子步允许的最多的迭代次数。默认值为 25，对大数热分析问题足够。命令：NEQIT。

自动时间步长：对于非线性问题，可以自动设定子步间载荷的增长，保证求解的稳定性和准确性。命令：AUTOTS。

收敛误差：可根据温度、热流率等检验热分析的收敛性。命令：CNVTOL。

求解结束选项：如果在规定的迭代次数内，达不到收敛，ANSYS 可以停止求解或到下一载荷步继续求解。命令：NCNV。

③ 输出控制。

控制打印输出：本选项可将任何结果数据输出到 *.out 文件中。命令：OUTPR。

控制结果文件：控制 *.rth 的内容。命令：OUTRES 。

4）确定分析选项。

① Newton-Raphson 选项。命令：NROPT。

② 选择求解器。可选择求解器中的一个进行求解。命令：EQSLV。

注意，热分析可选用 Iterative 选项进行快速求解，但如下情况除外：热分析包含 SURF19、SURF22 或超单元；热辐射分析；相变分析；需要 restart an analysis。

③ 确定 0K。在进行热辐射分析时，要将目前的温度值换算为热力学温度。如果使用的温度单位是℃，此值应设定为 273；如果使用的是℉，则为 460。命令：TOFFST。

5）求解，命令：SOLVE。

（3）后处理　ANSYS 将热分析的结果写入 *.rth 文件中，它包含如下数据：基本数据有节点温度；导出数据有节点及单元的热流密度，节点及单元的热梯度，单元热流率，节点的反作用热流率。进入 POST1 后，读入载荷步和子步：命令：SET。

可以通过如下三种方式查看结果：

1）彩色云图显示，命令：PLNSOL，PLESOL，PLETAB 等。

2）矢量图显示，命令：PLVECT。

3）列表显示，命令：PRNSOL，PRESOL，PRRSOL 等。

1.1.2　非稳态传热分析

瞬态热分析用于计算系统随时间变化的温度场和其他热参数。即在工程中一般用瞬态热分析计算温度场，并找到温度梯度最大的时间点，将此时间点的温度场作为热载荷进行应力

计算与分析。瞬态热分析的基本步骤与稳态热分析类似。主要的区别是瞬态热分析中的载荷是随时间变化的。

1. 建模

确定 jobname、title、units，进入 PREP7；定义单元类型并设置选项；如果需要，定义单元实常数；定义材料热性能，一般瞬态热分析要定义热导率、密度及比热容；建立几何模型；对几何模型划分网格。

2. 加载求解

定义分析类型。如果第一次进行分析，或重新进行分析，命令：ANTYPE，TRANSIENT，NEW；如果接着上次的分析继续进行(例如增加其他载荷)，命令：ANTYPE，TRANSIENT，REST。

获得瞬态热分析的初始条件。

① 定义均匀温度场。如果已知模型的起始温度是均匀的，可设定所有节点初始温度，命令：TUNIF。如果不在对话框中输入数据，则默认为参考温度，参考温度的值默认为零，但可通过如下方法设定参考温度：命令：TREF。初始均匀温度仅对分析的第一个子步有效；而设定节点温度将保持贯穿整个瞬态分析过程，除非通过下列方法删除此约束：命令：DDELE。

② 设定非均匀的初始温度。在瞬态热分析中，节点温度可以设定为不同的值，命令：IC。如果初始温度场是不均匀的且又是未知的，就必须首先作稳态热分析确定初始条件：设定载荷(如已知的温度、热对流等)；将时间积分设置为 OFF，命令：TIMINT，OFF；设定一个只有一个子步的、时间很小的载荷步(例如 0.001)，命令：TIME。写入载荷步文件，命令：LSWRITE；求解，命令：SOLVE。

3. 设定载荷步选项

1）普通选项。时间：本选项设定每一载荷步结束时的时间，命令：TIME，每个载荷步的载荷子步数，或时间增量。对于非线性分析，每个载荷步需要多个载荷子步。时间步长的大小关系到计算的精度，步长越小，计算精度越高，同时计算的时间越长。根据线性传导热传递，可以按如下公式估计初始时间步长

$$ITS = \delta^2/4\alpha$$

式中，δ 是沿热流方向热梯度最大处的单元的长度；α 是热扩散率，它等于热导率除以密度与比热容的乘积($\alpha = k/\rho c$)。命令：NSUBST 或 DELTIM。

如果载荷在这个载荷步是恒定的，需要设为阶跃选项；如果载荷值随时间线性变化，则要设定为渐变选项。命令：KBC。

2）非线性选项。

迭代次数：每个子步默认的次数为 25，这对大多数非线性热分析已经足够。命令：NEQIT。

自动时间步长：本选项为 ON 时，在求解过程中将自动调整时间步长。命令：AUTOTS。

时间积分效果：如果将此选项设定为 OFF，将进行稳态热分析。命令：TIMINT。

3）输出选项。控制打印输出：本选项可将任何结果数据输出到 *.out 文件中，命令：OUTPR。

控制结果文件：控制 *.rth 的内容，命令：OUTRES。

4）存盘求解。单击 ANSYS 工具条中的 SAVE _ DB，命令：SOLVE。

4. 后处理

ANSYS 提供两种后处理方式。

1）用 POST1 进行后处理。进入 POST1 后，可以读出某一时间点的结果，命令：SET。采用与稳态热分析类似的方法，对结果进行彩色云图显示、矢量图显示、打印列表等后处理。

2）用 POST26 进行后处理。首先定义变量，命令：NSOL 或 ESOL 或 RFORCE；然后就可以绘制这些变量随时间变化的曲线，命令：PLVAR；列表输出，命令：PRVAR。

1.1.3 热辐射

辐射是一种通过电磁波传递能量的方式。电磁波以光速传播且无需任何介质。热辐射仅为电磁波谱中的一小段。因为由于热辐射引起的热流与物体表面绝对温度的四次方成正比，因此热辐射分析是高度非线性的。ANSYS 提供了三种方法分析热辐射问题：用 LINK31 辐射线单元分析两个点或多对点之间的热辐射；用表面效应单元 SURF19 或 SURF22 分析点对面的热辐射；用 AUX12 热辐射矩阵生成器分析面与面之间的热辐射。

1. 定义辐射面

1）在 PREP7 中建模、划分网格。

2）在辐射表面用 SHELL57(3-D)单元或 LINK32(2-D)单元划分网格。最好的方法是先选择辐射表面的节点，然后用如下方法创建 SHELL57 单元或 LINK32 单元。命令：ESURF。

3）如果所分析的系统是开放的，即一个面所辐射的热能未被模型中其他的面吸收，则必须定义一个空间节点，用于吸收损失的辐射热量。这个节点的位置是任意的。对于封闭的系统，不应定义空间节点。

2. 生成辐射矩阵

1）进入 AUX12。命令：/AUX12。

2）选择组成辐射面的节点和单元。比较方便的方法是根据单元类型选择单元，并选择单元上的节点。

3）确定模型是 3-D 还是 2-D，命令：GEOM，AUX12 用不同的算法计算 2-D 或 3-D 模型的形状系数。

4）定义每个辐射面的辐射率(默认为 1)。命令：EMIS。

5）定义斯蒂芬-玻耳兹曼(Stefan-Boltzmann)常数。命令：STEF。

6）确定用什么方式计算形状系数。命令：VTYPE。

7）如为开放系统，定义空间节点。命令：SPACE。

8）计算辐射矩阵并写入 jobname. sub 文件。命令：WRITE。

9）选择所有的节点和单元。

3. 在热分析中使用辐射矩阵

1）重新进入 PREP7，定义一个新的单元类型 MATRIX50(超单元)。

2）将单元类型指向超单元。命令：TYPE。

3）读入超单元矩阵。命令：SE。

4）不选择或删除用于生成辐射矩阵的 SHELL57 单元或 LINK32 单元。命令：EDELE。

5）进入/SOLUTION 施加其他热载荷并求解。

1.2　ANSYS 软件在温度场模拟中的应用实例

1.2.1　实例 1—电阻加热的稳态三维温度场模拟

一导线的半径为 1.015mm，电阻率为 $8\times10^{-5}\Omega\cdot cm$，热导率为 19.03W/(m·K)，电能产生的功率为 $1.718\times10^{9}W/m^{3}$。求加热到稳态后的温度分布情况。

命令流如下：

```
/clear                                  ! 清理数据库
/filname,ex1-1                          ! 定义隐式热分析文件名
/prep7                                  ! 进入前处理器
et,1,solid70                            ! 选择单元类型
mp,KXX,1,19.03                          ! 定义电阻丝的热导率
cylind,0.001015,0,0,0.0015,0,90         ! 建立 1/4 电阻丝三维几何模型
esize,0.00025,0,                        ! 设置单元划分尺寸
mshkey,1                                ! 设置映射划分单元类型
vmesh,1                                 ! 划分网格
bfv,1,hgen,1.718e9                      ! 施加热生成载荷
da,1,temp,0                             ! 施加温度边界条件
/solu                                   ! 进入求解器
antype,static                           ! 设置为稳态求解
time,2                                  ! 定义求解时间
solve                                   ! 求解
/post1                                  ! 进入后处理器
set,last                                ! 读入最后子步结果
plnsol,temp,,0,                         ! 显示温度分布云图
/expand,27,axis,,,10                    ! 设置 270°三维周期扩展选项(见图 1-1)
```

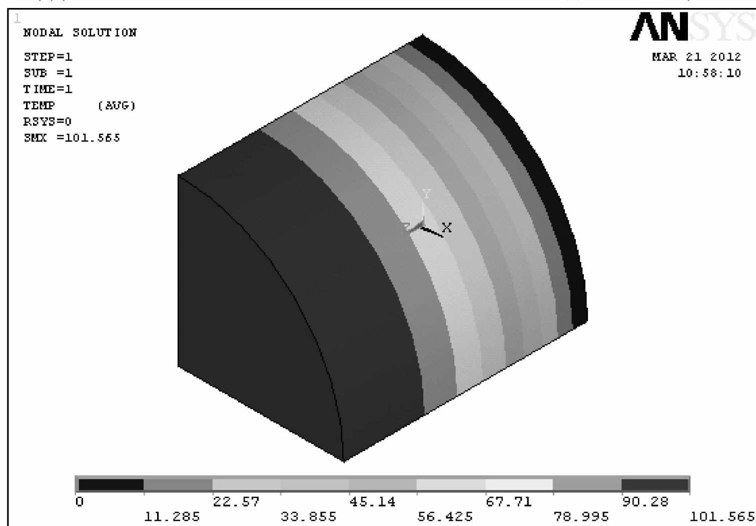


图 1-1　三维温度分布云图

```
plnsol,temp,,0,                                    ! 显示温度分布云图
/exit,nosav                                        ! 退出 ANSYS
```

1.2.2 实例 2—稳态热辐射温度场模拟

内、外两个圆形环彼此辐射，内环外表面的辐射率为 0.9，其内表面温度为 1500℃。外环内表面辐射率为 0.7，其外表面温度为 100℃，环境温度为 70℃。计算 1s 后的温度分布，如图 1-2 所示。

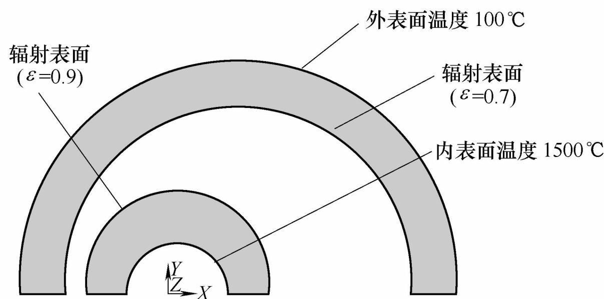


图 1-2 双圆环

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex1 -2                                    ! 定义隐式热分析文件名
/title,radiation between circular annulus          ! 使用二维辐射的实例分析
/prep7
cyl4,0,0,.5,0,.25,180!                             内环
cyl4,0.2,0,1,0,.75,180!                            外环
et,1,plane55                                       ! 2 -D 热单元
lsel,s,line,,1
sfl,all,rdsf,.9,,1,                                ! 内环辐射边界条件
lsel,s,line,,7
sfl,all,rdsf,.7,,1,                                ! 外环辐射边界条件
lsel,s,line,,3
dl,all,,temp,1500,1                                ! 内环温度
lsel,s,line,,5
dl,all,,temp,100,1                                 ! 外环温度
allsel
stef,0.119e -10                                    ! 常数
toffst,460                                         ! 温度补偿
radopt,0.5,0.01,0,                                 ! 求解选项
spctemp,1,70                                       ! 外层壳的温度
v2dopt,0.0,0,0,                                    ! 2 -D 视图
esize,0.05,
amesh,all
mp,KXX,1,.1                                        ! 热导率
```

```
finish
/solu
time,1
deltim,.5,.1,1
neqit,1000
solve
finish
/post1
asel,s,area,,1
nsla,s,1
prnsol,temp                                  ! 温度分布(见图 1-3)
finish
```

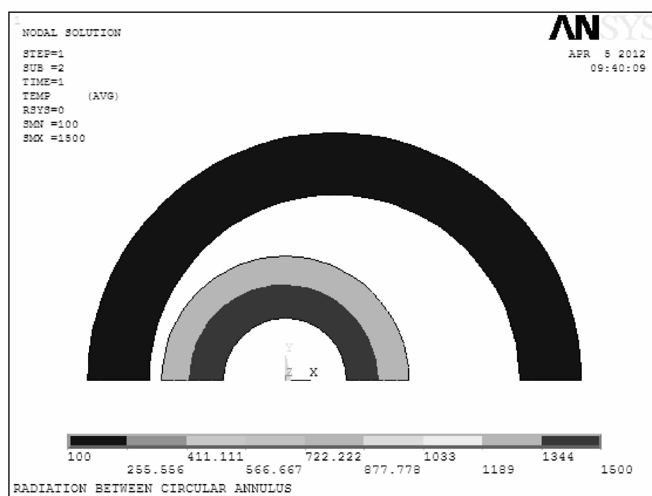


图 1-3　温度分布图

1.2.3　实例 3—电磁感应加热进程的温度场分布

工件的外半径为 0.015m，线圈内外半径分别为 0.0175m 和 0.02m。感应加热频率为 150000Hz。计算稳定加热时的温度场分布。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex1-3                               ! 定义分析文件名
/title,induction heating
/prep7                                       ! 进入前处理器
row=.015                                     ! 工件的外半径
ric=.0175                                    ! 线圈内半径
roc=.0200                                    ! 线圈外半径
ro=.05                                       ! 空气模型的外半径
t=.001                                       ! 模型的轴向高度
freq=150000                                  ! 加热频率(Hz)
```

```
pi = 4 * atan(1)                                   ! 定义圆周率参数
cond = .392e7                                      ! 最大热导率
muzero = 4e - 7 * pi                               ! 自由空间的磁导率
mur = 200                                          ! 最大相对磁导率
skind = sqrt(1/(pi * freq * cond * muzero * mur))  ! 集肤效应深度
ftime = 3                                          ! 计算时间
tinc = .05                                         ! 谐响应分析时间步
time = 0                                           ! 初始计算时间
delt = .01                                         ! 最大时间间隔
                                                   ! 电磁场分析模型
et,1,53,,,1                                        ! 选择单元类型并设置为轴对称分析
et,2,53,,,1
emunit,mks                                         ! 设置电磁场分析单位
mp,murx,1,1                                        ! 定义空气相对磁导率
mp,murx,3,1                                        ! 定义线圈相对磁导率
mptemp,1,25.5,160,291.5,477.6,635,698              ! 定义与磁导率对应的温度
mptemp,7,709,720.3,742,761,1000
mpdata,murx,2,1,200,190,182,161,135,104            ! 定义钢坯料相对磁导率
mpdata,murx,2,7,84,35,17,1,1
mptemp
mptemp,1,0,125,250,375,500,625                     ! 定义与电阻对应的温度
mptemp,7,750,875,1000
mpdata,rsvx,2,1,.184e - 6,.272e - 6,.384e - 6,.512e - 6,.656e - 6,.824e - 6
mpdata,rsvx,2,7,1.032e - 6,1.152e - 6,1.2e - 6     ! 定义钢坯料电阻
mptemp
mptemp,1,0,730,930,1000                            ! 定义与热导率对应的温度
mpdata,KXX,2,1,60.64,29.5,28,28                    ! 定义钢坯料热导率
mptemp                                             ! 定义与坯料焓值对应的温度
mptemp,1,0,27,127,327,527,727
mptemp,7,765,765.001,927
mpdata,ENTH,2,1,0,91609056,453285756,1.2748e9,2.2519e9,3.3396e9
mpdata,ENTH,2,7,3.548547e9,3.548556e9,4.3520e9     ! 定义坯料焓值
mp,emis,2,.68                                      ! 定义热辐射系数
rectng,0,row,0,t                                   ! 建立坯料的几何模型
rectng,row,ric,0,t                                 ! 建立坯料和线圈间的几何模型
rectng,ric,roc,0,t                                 ! 建立线圈的几何模型
rectng,roc,ro,0,t                                  ! 建立坯料外面空气的几何模型
aglue,all                                          ! 粘接各矩形
numcmp,area                                        ! 压缩面编号
ksel,s,loc,x,row                                   ! 选择坯料外圆的关键点
kesize,all,skind/2                                 ! 设置关键点附近单元划分尺寸
ksel,s,loc,x,0                                     ! 选择中心的关键点
kesize,all,40 * skind                              ! 设置关键点附近单元划分尺寸
```

```
lsel,s,loc,y,t/2                    ! 选择垂直的直线
lesize,all,,,1                      ! 设置直线划分段数
lsel,all
asel,s,area,,1
aatt,2,1,1                          ! 附于坯料属性
asel,s,area,,3
aatt,3,1,2                          ! 附于线圈属性
asel,s,area,,2,4,2
aatt,1,1,2                          ! 附于空气属性
asel,all
mshape,0,2d
mshk,1
amesh,1                             ! 划分坯料单元
lsel,s,loc,y,0
lsel,a,loc,y,t
lsel,u,loc,x,row/2
lesize,all,.001
lsel,all
amesh,all                           ! 划分线圈和空气单元
nsel,s,loc,x
d,all,az,0                          ! 施加磁势边界条件
nsel,all
esel,s,mat,,3
bfe,all,js,,,,15e6                  ! 施加电流密度
alls                                ! 温度场分析模型
et,4,55,,,1                         ! 选择 PLANE55 热分析单元,并设置为轴对称分析
agen,2,1,,,,,,,1
aatt,2,1,4
ksel,s,loc,x,row                    ! 选择坯料外圆的关键点
kesize,all,skind/2                  ! 设置关键点附近单元划分尺寸
ksel,s,loc,x,0                      ! 选择中心的关键点
kesize,all,40*skind                 ! 设置关键点附近单元划分尺寸
lsel,s,loc,y,t/2                    ! 选择垂直的直线
lesize,all,,,1                      ! 设置直线划分段数
lsel,all
mshape,0,2d
mshk,1
amesh,5
asel,,,,5
allsel,below,area
nsel,r,loc,x,row
sf,all,rdsf,0.68,1                  ! 施加热辐射系数
alls
```

```
spctemp,1,25                          ! 设置环境温度
v2dopt,1
radopt,,0.01
stef,5.67e-8                          ! 设置斯蒂芬—波尔兹曼常数
esel,s,mat,,2                         ! 选择坯料
bfe,all,fvin,,1                       ! 设置电磁热耦合边界
finish
/solu
mfan,on                               ! 激活多场耦合分析
mfel,1,1,2                            ! 定义电磁场分析单元
mfel,2,4                              ! 定义温度场分析单元
mfor,1,2                              ! 电磁场和温度场求解顺序
mfan,on,mfsc
mfti,ftime,                           ! 求解时间
mfdt,tinc,0.01,0.07,0                 ! 定义时间求解子步
mfrs,0,
mfco,all,1e-3                         ! 定义收敛误差
antyp,harm                            ! 电磁分析类型选择
harfrq,150000                         ! 设置电磁频率
outres,all,all                        ! 定义输出控制
tunif,100                             ! 施加温度载荷
mfcm,1,                               ! 写电磁场分析
mfclear,solu                          ! 清理分析数据
antype,trans                          ! 定义温度场分析类型
toffst,273                            ! 设置温度偏移量
tunif,100                             ! 施加温度载荷
kbc,1                                 ! 定义阶跃载荷施加方式
cnvtol,heat,1                         ! 定义热收敛准则
trnopt,full
autos,on                              ! 打开自动时间开关
deltim,.01,.005,.01,on                ! 时间步控制
mfcm,2,                               ! 写温度场分析
mfvo,1,1,hgen,2                       ! 设置电磁场到温度场结果传输
mfvo,1,2,temp,1                       ! 设置温度场到电磁场结果传输
allsel,all
solve                                 ! 求解
save                                  ! 存盘
finish
/post1                                ! 进入后处理器 post1
file,field2,rth                       ! 读取温度场分析结果
set,last                              ! 读取 3s 时的分析结果
esel,s,type,,4                        ! 选择温度场分析单元
plns,temp                             ! 显示坯料温度场分布云图(见图 1-4)
```

```
finish
/exit,nosav                                   ! 退出 ANSYS
```

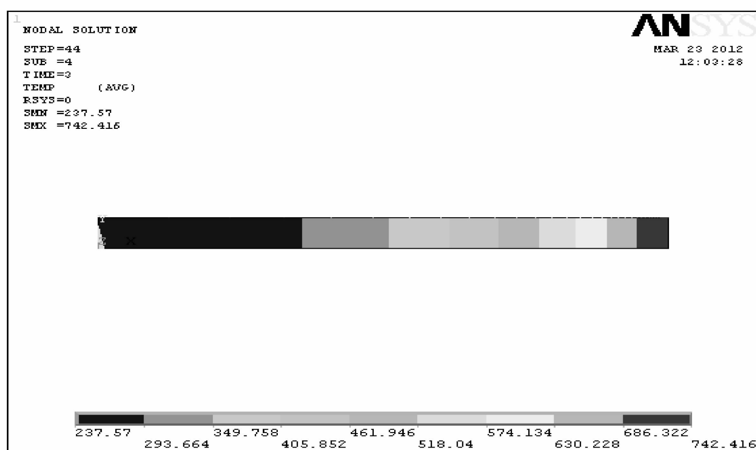


图 1-4　坯料温度场分布云图

1.2.4　实例 4—钢板加热瞬态热分析

一块尺寸为 50mm×50mm×100mm 的钢板，初始温度为 20℃，放入温度为 1120℃的加热炉内加热，已知其表面传热系数为 125W/(m^2·K)，钢板的比热容为 460J/(kg·K)，密度为 7850kg/m^3，热导率为 50W/(m·K)，计算钢板 1800s 后的温度场分布。此问题属于热瞬态分析(载荷随时间变化)，选用 SOLID70 三维六面体单元进行有限元分析。单元具有 8 个节点，每个节点有一个温度自由度。该单元可用于三维的稳态或瞬态的热分析问题。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex1-4                                ! 定义隐式热分析文件名
/prep7                                        ! 进入前处理器
et,1,solid70                                  ! 选择单元类型
mp,KXX,1,50                                   ! 定义钢板的热导率
mp,DENS,1,7850                                ! 定义钢板的密度
mp,C,1,460                                    ! 定义钢板的比热容
block,0,1,0,1,-0.05,0.05,                     ! 建立 1/4 钢板的三维几何模型
allsel,all
esize,0.03,0,                                 ! 定义单元尺寸
mshkey,1                                      ! 设置映射单元类型
vmesh,all                                     ! 划分单元
/solu                                         ! 进入求解器
tunif,20                                      ! 定义初始温度
sfa,1,1,conv,125,1120                         ! 在 1 号面上施加对流换热载荷
sfa,2,1,conv,125,1120                         ! 在 2 号面上施加对流换热载荷
sfa,4,1,conv,125,1120                         ! 在 4 号面上施加对流换热载荷
sfa,6,1,conv,125,1120                         ! 在 6 号面上施加对流换热载荷
```

```
antype,trans                                   ! 设置为瞬态求解
kbc,1
outres,,all                                    ! 定义结果输出
toffst,273                                     ! 定义温度偏移量
allsel,all                                     ! 选择所有节点
autots,on                                      ! 打开自动时间开关
deltim,50,50,100                               ! 定义时间子步
time,1800                                      ! 定义求解时间
solve                                          ! 求解
/post1                                         ! 进入后处理器 post1
set,last                                       ! 读入最后子步结果
plpagm,tr,1,blank                              ! 在几何模型上显示径向温度分布云图
plnsol,temp,,0,                                ! 显示温度分布云图
/expand,4,polar,half,,360                      ! 设置三维周期扩展选项
plnsol,temp,,0,                                ! 显示温度分布云图(见图 1-5)
/expand                                        ! 关闭三维周期扩展选项
/exit,nosav                                    ! 退出 ANSYS
```

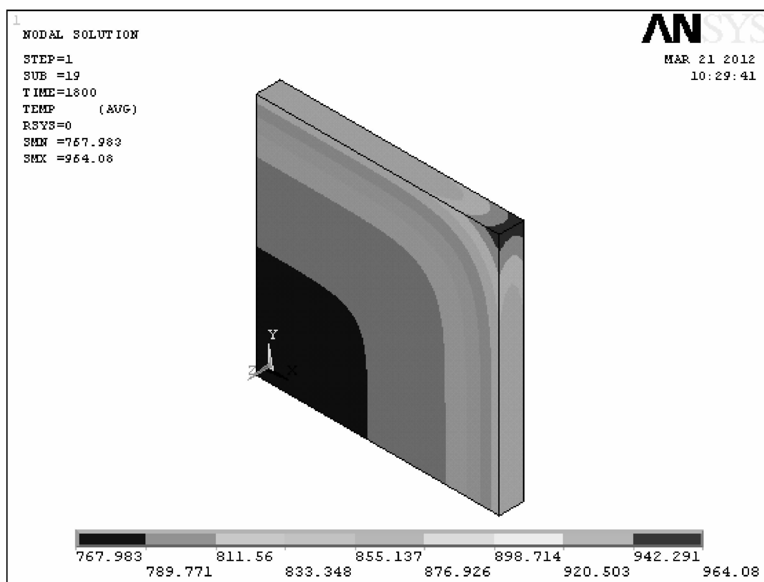


图 1-5 温度分布三维云图

1.2.5 实例 5—相变过程分析

相变系统能量的变化(增加或减少)可能导致物质的原子结构发生改变。通常的相变过程称为固结、溶化、汽化或凝固。2mm 圆柱试管中有高度为 15mm 的水，性能参数见表 1-1，初始温度为 0℃，在水面上施加大小为 -10℃的均匀温度载荷，试求需要多长时间水才能完全结冰(所有温度都在 1℃以下)，以及时间 $t=1200$s 时，水内部的温度分布(试管材料对水温的影响忽略不计)。

表 1-1　水—冰的性能参数

温度/℃	热导率/[W/(m·K)]	密度/(kg/m^3)	焓/(J/m^3)
-10	0.6	1000	0
-1	0.6	1000	3.78e7
0	0.6	1000	7.98e7
10	0.6	1000	1.22e8

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex1 -5                         ! 定义隐式热分析文件名
/prep7                                  ! 前处理
et,1,plane55                            ! 选择单元
keyopt,1,1,0
keyopt,1,3,1
keyopt,1,4,0
keyopt,1,8,0
keyopt,1,9,0
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0                              ! 定义材料性能参数
mpdata,KXX,1,,0.6
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,DENS,1,,1000
mptemp,,,,,,,,                          ! 设置水的焓变化
mptemp,1,-10
mptemp,2,-1
mptemp,3,0
mptemp,4,10
mpdata,ENTH,1,,0
mpdata,ENTH,1,,3.78e7
mpdata,ENTH,1,,7.98e7
mpdata,ENTH,1,,12.2e7
rectng,0,0.002,0,0.015,                 ! 几何建模
smrtsize,0                              ! 划分网格
lsel,s,line,,1,3,2
lesize,all,,,3,,,,,1
lsel,s,line,,2,4,2
lesize,all,,,20,,,,,1
allsel,all
amesh,1                                 ! 划分单元
finish
```

```
/solu                                   ! 求解
antype,4                                ! 定义分析类型
trnopt,full
outres,all,all,                         ! 定义结果输出
tunif,0,                                ! 定义初始温度
lsel,s,,,3
nsll,s,1
d,all,,-10,,,,temp,,,,,                 ! 施加温度载荷
allsel,all
time,1200                               ! 定义求解时间
autots,1
deltim,3,3,10,1
kbc,1                                   ! 求解
solve
finish
/post1                                  ! 进入后处理器 post1
set,,,1,,200,,
plnsol,temp,,0,                         ! 温度分布(见图 1-6)
finish
```

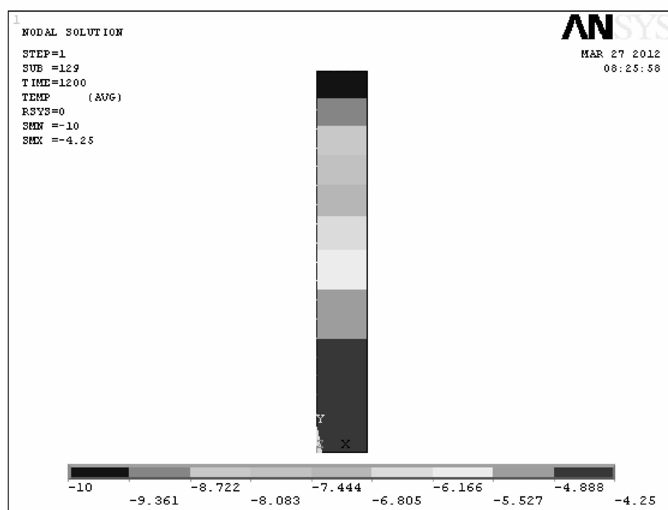


图 1-6 1200s 时的温度分布

1.2.6 实例 6—滑动摩擦生热过程三维模拟

同种材料在摩擦热和力场的耦合作用下，摩擦的接触区表现出了局部温度变化、应力变化等特性，接触面由摩擦产生热，这些热以热流的形式分别进入上试样和下试样(见图 1-7)。上下金属块的材料性能参数：弹性模量为 1e11Pa，泊松比为 0.3，热膨胀系数为 $1.71e^{-5}K^{-1}$，密度为 $8889kg/m^3$，热导率为 383W/(m·K)，摩擦系数为 0.2，下金属块的几何尺寸为 10m×2m×0.1m，上金属块的尺寸为 0.2m×0.3m×0.1m，滑动距离为 0.2m。

为了使问题易于处理，但不失去其意义，作出以下假设：忽略泄漏所带走的摩擦热；忽略因热辐射导致的热损失；认为各层材料的参数都是各向同性的；与整体摩擦热相比，磨屑带走的热量很小忽略不计；对流换热产生于试样的四周，换热系数与温度及试样的空间位置无关；上下试样材料的密度随温度的变化比较小，忽略密度随温度的变化。

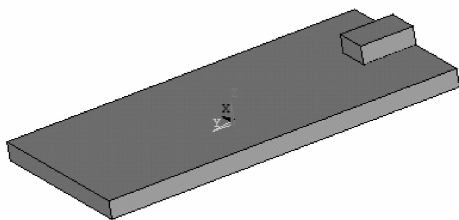


图 1-7　滑动摩擦示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex1 -6                          ! 定义隐式热分析文件名
/prep7                                   ! 前处理
et,1,solid5                              ! 选择单元
et,2,targe170
et,3,conta174
keyopt,3,1,1
keyopt,3,5,1
et,4,surf154
keyopt,4,4,1
r,1,,,.1
r,2
mp,ex,1,1e11                             ! 材料性能参数
mp,prxy,1,0.3
mp,alpx,1,1.71e -5
mp,DENS,1,8889
mp,KXX,1,383
mp,C,1,390
mp,mu,1,0.2
/view,1,1,1,1
block,-.5,.5,-1,1,0,0.1                  ! 几何建模
block,-0.1,0.1,-1,-0.7,0.1,0.2
esize,0.05                               ! 划分网格
mshape,0
mshkey,1
vmesh,all
asel,s,,,7
nsla,s,1
real,1
type,2
esurf
alls
asel,s,,,2
nsla,s,1
```

```
nsel,r,loc,x,-0.3,0.3
real,1
type,3
esurf
alls
asel,s,,,8
nsla,s,1
type,4
real,2
esurf
alls
finish
/solu                                    ! 求解
antype,trans                             ! 选择分析类型为瞬态分析
nlgeom,on
lnsrch,on
kbc,0
autots,on
nsubst,10,20,6
outres,all,all
toffst,273
ic,all,temp,20
tunif,20
sfa,all,,conv,1,30
alls
da,1,ux                                  ! 外力
da,1,uy
da,1,uz
esel,s,type,,4
sfe,all,1,pres,,100e6
sfe,all,3,pres,,2e6
esel,all
vsel,s,,,2
nslv,s,1
d,all,uy,0.2
d,all,ux
alls
time,0.01
solve
vsel,s,,,2
nslv,s,1
ddele,all,uy
alls
```

```
kbc,0
time,100
nsubst,30,50,20
solve                                    ! 求解
set,,,1,,200,,
plnsol,temp,,0.01,                       ! 温度分布(见图 1-8)
finish
```

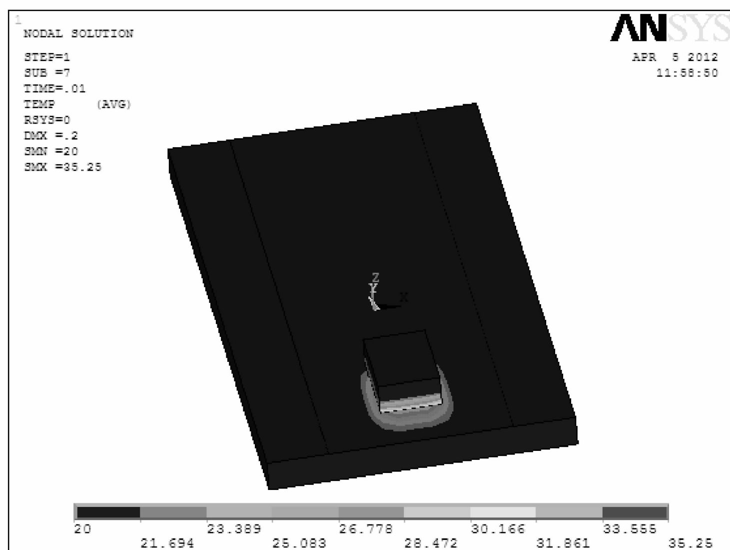


图 1-8　温度分布

1.2.7　实例 7—移动温度载荷下的温度场

一块带孔的 0.1m×0.1m aisi1045 钢板，环境和钢板的初始温度均为 25℃，表面传热系数为 100W/(m^2·K)，在钢板右边施加 50W 的外来热流载荷。求 25s 后的温度分布

命令流如下：

```
/clear
/com,units:si,
/title,transient analysis 2(moving heat flux)
/filname,ex1-7
/triad,rbot
/prep7
wpstyle,,,,,,,,1
wpstyle,0.01,0.01,0,0.1,0.003,0,1,,5
blc4,0,0.1,0.1,-0.1                      ! 0.1m×0.1 m
cyl4,0.03,0.05,0.01
asba,1,2                                 ! 生成孔
blc4,0.1,0.1,-0.01,-0.1
flst,2,2,5,orde,2
```

```
fitem,2,1
fitem,2,3
aovlap,p51x
wpstyle,,,,,,,,0
aplo                                    ! 选择单元
et,1,plane55
keyopt,1,1,0
keyopt,1,3,0
keyopt,1,4,0
keyopt,1,8,0
keyopt,1,9,0
! 定义 aisi 1045 钢性能参数
uimp,1,DENS,,,7870 ,                    ! 单位为 kg/m3
uimp,1,KXX,,,51.9 ,                     ! W/(m·K)
uimp,1,C,,,486,                         ! J/(kg·K)
type,1
mat,1
esize,0.002,                            ! 单元尺寸
mshkey,1
amesh,1
mshkey,0
amesh,2
/psf,hflu,,2,0                          ! 加载对流边界条件
flst,2,1,4,orde,1
fitem,2,4
sfl,p51x,conv,100,,25,
finish
/solu
antype,trans
trnopt,full
nropt,auto,,
eqslv,
solcontrol,on
autots,on
kbc,1
outres,all,all,
time,0.001
deltim,0.001,0.001,0.001
timint,off
tunif,25,
solve
timint,on                               ! 施加移动热流载荷
j=1
```

```
*do,i,200,80,-5
time,j
deltim,0.11,0.11,0.11,
sfedele,i+5,2,hflux                    ! 删除以前热流载荷
sfe,i,2,hflux,,50/0.002/0.002,,,       ! 施加外来热流载荷
eplot
solve
j=j+1
*enddo
finish
/post1
/eface,1
set,last
plnsol,temp,,0,                        ! 温度场分布(见图 1-9)
finish
```

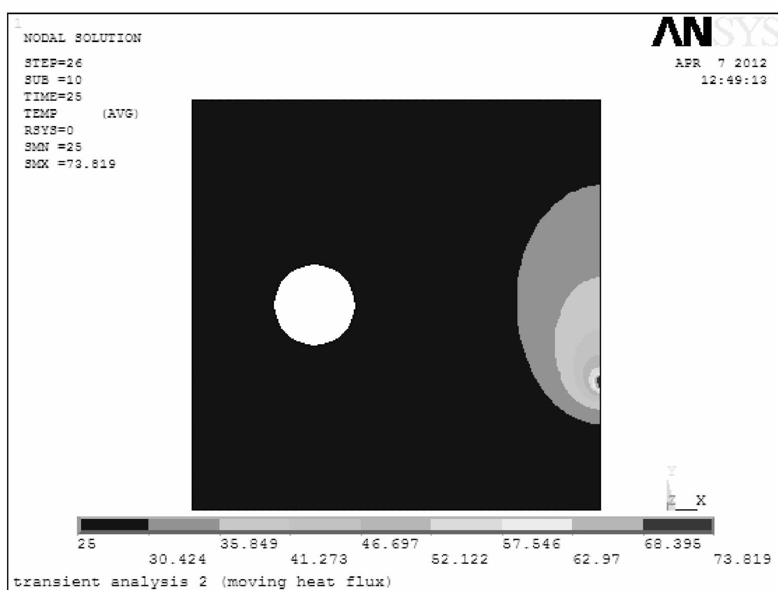


图 1-9　温度场分布

1.3　本章总结

利用 ANSYS 软件进行温度场模拟，包括几何建模、定义材料性能参数、划分单元、求解等。掌握定义初始温度场的操作，可以定义均匀温度场初始条件，了解非均匀温度场初始条件的定义方法；掌握瞬态温度分析选项的设定，并理解各选项对分析的影响，可以根据模型的复杂程度和载荷的特性设置合理的参数。掌握根据时刻查看温度场的操作，了解 ANSYS 热分析结果提取的注意事项，尽量避免出现线性插值方式提取结果；需要了解的就是在节点上施加温度约束的优先等级，即第一次定义的温度约束会被随后定义的温度约束覆盖。

1.4　练习题

1）用 ANSYS 软件分析温度场的种类包含哪些？

2）温度场的基本知识（傅里叶导热定律、导热微分方程及其定解条件等）及其在 ANSYS 软件中的操作、相关参数的处理。

3）热传导模型如图 1-10 所示。材料的热导率为 10W/(m・K)，假定材料无限长。分析其温度场的分布情况。

4）一圆筒形的罐有一接管，罐的外径为 3m，内径为 2.6m，接管外径为 1m，内径为 0.8m（见图 1-11），罐与接管的轴线垂直且接管远离罐的端部。求罐与接管的温度分布。罐内流体温度为 450℃，与罐壁的表面传热系数为 250W/(m^2・K)。接管内流体的温度为 100℃，与管壁的表面传热系数随管壁温度而变。接管与罐为同一种材料，其热物理性能见表 1-2。

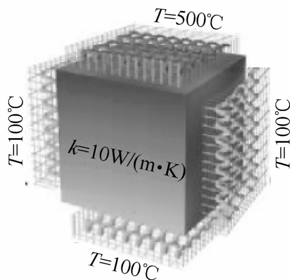


图 1-10　稳态热分析模型

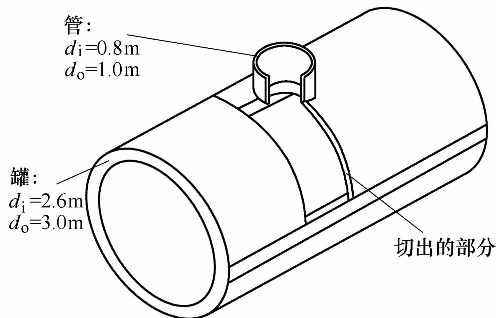


图 1-11　圆筒形的罐

表 1-2　材料的热物理性能

温度/℃	70	200	300	400	500
密度/(kg/m^3)	0.285	0.285	0.285	0.285	0.285
热导率/[W/(m・K)]	8.35	8.90	9.35	9.8	10.23
比热容/[J/(kg・K)]	0.113	0.117	0.119	0.122	0.125
表面传热系数/[W/(m^2・K)]	426	405	352	275	221

5）受热载荷作用的厚壁圆筒（高度为 0.5m）的有限元建模与温度场求解，设密度、热导率、比热容的数值为 1。计算分析模型如图 1-12 所示。

6）如图 1-13 所示，一个厚板中间有一个小孔，其模型及其边界条件如下。单元：选取四边形 4 节点 55 单元用于热分析。材料：1#材料和 2#材料的热导率分别为 20W/(m・K) 和 50W/(m・K)，顶边表面传热系数 $h=150$。约束：底边绝热。热源：沿小孔内边有一热源，热功率为 100W/m^2。求：复合板的温度场分布。提示：稳态热传导分析。

7）复合材料墙广泛应用于寒冷地区的建筑，使建筑物与周围的冷环境隔离，减少热损失，降低能耗。一般的复合材料墙大致结构如下。墙内部主要为绝热材料，一般两层交叉排列。本题中取墙的一段进行分析，评估墙的保暖性。材料参数：复合材料墙的外部材料为

钢，热导率为 10W/(m·K)。绝热材料的热导率为 0.1W/(m·K)。约束：外界环境温度为 220K，表面传热系数为 200W/(m^2·K)。右侧室内温度为 300K，表面传热系数为 20 W/(m^2·K)。墙的两侧为对流传热。几何参数：几何参数如图 1-14 所示。求：沿长度方向的热流场分布；复合材料的温度场分布；绘制热流矢量图。提示：不考虑时间因素，分析类型为稳态热传导分析。

8）分析水坝渗漏情况，计算并绘制大坝下的多空隙土壤内的渗漏速度场。

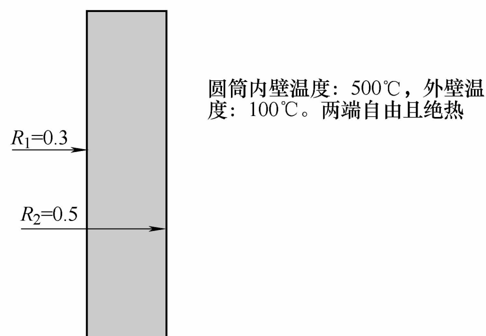


图 1-12　受热载荷作用的厚壁圆筒的计算分析模型（截面图）

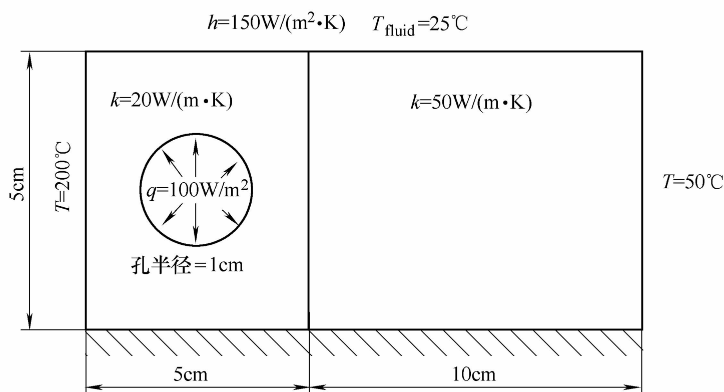


图 1-13　稳态热传导分析

单元：参考热场分析所用单元。几何参数：大坝尺寸如图 1-15 所示，单位为 m。多空隙土渗透性：10。求：绘制坝下渗漏速度场；绘制渗漏出口处速度变化曲线（坝至右侧多空隙图边缘，长度为 9m）。提示：此问题可以视为热场分析。坝视为绝热体，水压视为温度边界。渗透性视为热导率。

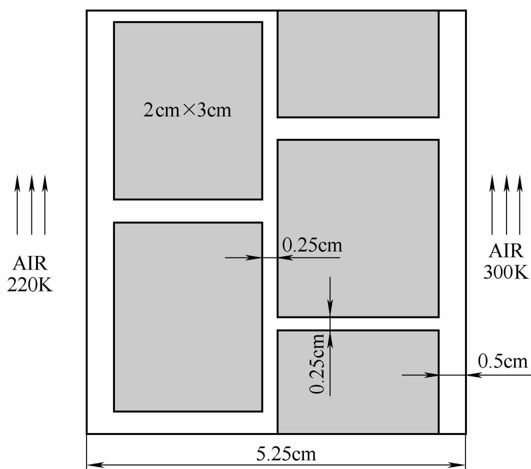


图 1-14　复合保暖墙

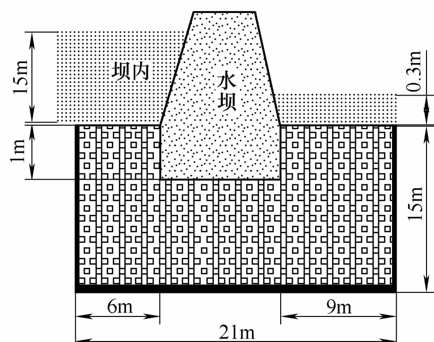


图 1-15　渗漏分析

9）瞬态传热模型如图 1-16 所示。几何参数：边长为 1m 的立方体。材料参数：热导率为 5W/(m · K)，材料密度为 920kg/m^3，比热容为 2. 040kJ/(kg · K)。约束(热载荷)：材料的初始温度为 20℃，上表面突然施加 500℃的温度场，下表面突然施加 100℃温度场，其他面绝热。求：300s 后，立方体的温度场并动画显示 0 ~300s 立方体的温度变化；绘制立方体中心温度随时间变化的曲线。提示：将立方体简化为二维模型分析。

10）长方形的板，几何参数及其边界条件如图 1-17 所示。板的宽度为 5cm，其中间有一个半径为 1cm 的圆孔。板的初始温度为 20℃，将其右侧突然置于温度为 20℃且表面传热系数为 100W/(m^2 · K)的流体中，左端置于温度为 500℃的温度场中，试计算：

① 第 1s 和第 50s 板内的温度分布情况。

② 整个板在前 50s 内的温度变化过程。

③ 圆孔边缘 A 点处温度随时间变化曲线。

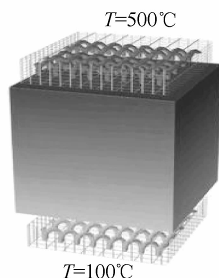


图 1-16　瞬态传热分析模型

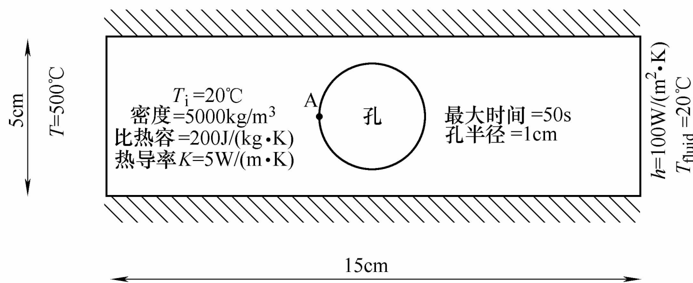


图 1-17　瞬态传热分析模型

11）将一个质量为 30kg、温度为 70℃的铜块和一个质量为 20kg、温度为 80℃的铁块突然放入温度为 20℃、盛满了 300L 水的、完全绝热的水箱中，如图 1-18 所示。过了 1h，求铜块与铁块的最高温度(假设忽略水的流动)。材料热物理性能见表 1-3。

表 1-3　材料物理性能参数

热性能	铜	铁	水
热导率/[W/(m · K)]	383	70	0. 61
密度/(kg/ m^3)	8889	7833	996
比热容/[J/(kg · K)]	390	448	4185

12）等轴同心圆柱面的辐射传热。有两个等长度的同心长圆柱面 1 和 2，半径分别为 0. 1m 和 0. 2m(见图 1-19)，横截面面积均为 1m^2，温度分别为 800℃和 200℃，两圆柱面的材料性能参数见表 1-4，求两圆柱面间的辐射热流率。

表 1-4　材料性能参数

热导率 K_1/[W/(m · K)]	热导率 K_2/[W/(m · K)]	辐射率 ε_1	辐射率 ε_2
1	1	0. 8	0. 6

13）潜水艇壁的温度场分析。某一潜水艇可以简化为一圆筒，它由三层组成，最外面一层为不锈钢，中间为玻璃纤维隔热层，最里面为铝层，筒内为空气，筒外为海水，求内外

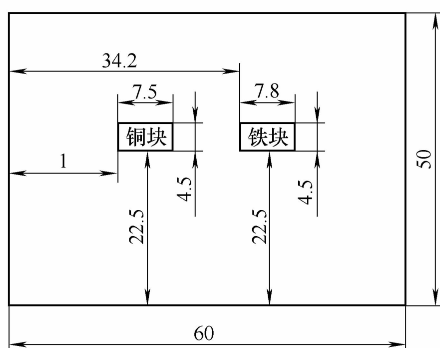


图 1-18 瞬态传热分析模型

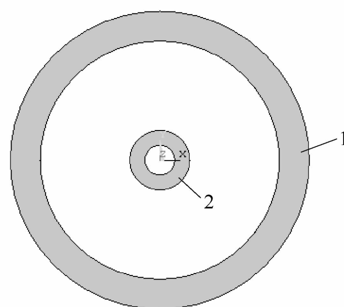


图 1-19 同心长圆柱面的横截面

壁面的温度及温度分布。

几何参数：	筒外径	30mm
	总壁厚	2mm
	不锈钢层壁厚	0.75mm
	玻璃纤维层壁厚	1mm
	铝层壁厚	0.25mm
	筒长	200mm
热导率	不锈钢	8.27W/(m·K)
	玻璃纤维	0.028 W/(m·K)
	铝	117.4 W/(m·K)
边界条件	空气温度	70℃
	海水温度	44.5℃
	空气对流系数	2.5Btu/(ft^2·h·℉)㊀
	海水对流系数	80Btu/(ft^2·h·℉)

圆筒的横截面为一圆环，取其中 1°进行分析，如图 1-20 所示。

14）较复杂边界条件的热传导模拟。复杂边界条件热传导模型的边界情况如图 1-21 所

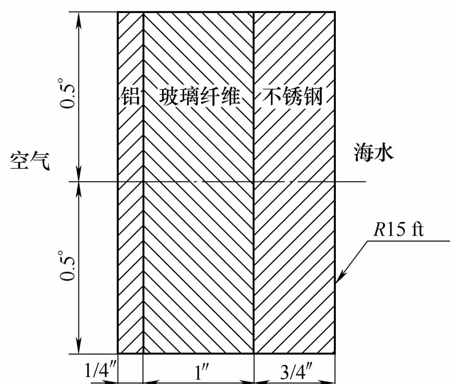


图 1-20 潜水艇外壳材料及几何尺寸

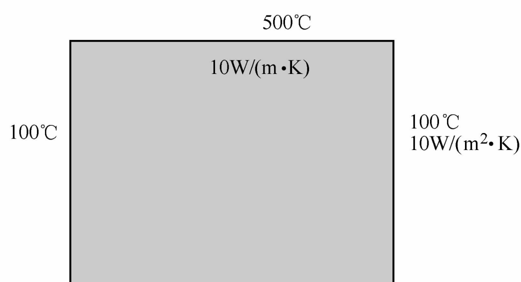


图 1-21 复杂边界条件的热传导模型

㊀ 1Btu/(ft^2·h·℉)=5.67826W/(m^2·K)。

示。注意：实体模型假定为无限长，求平板温度场的分布。

15）简单热传导温度场模拟。热传导模型如图 1-22 所示。材料的热传导率为 10W/(m・K)，材料假定无限长，截面尺寸为 1m。分析其温度场分布。

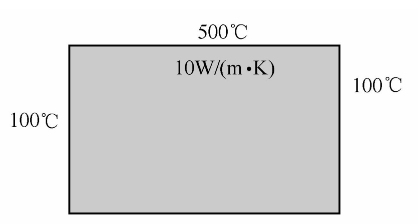


图 1-22 简单热传导模型

第 2 章　基于 ANSYS 软件的应力场数值模拟

2.1　应力场的基本理论及 ANSYS 应用基础

2.1.1　弹塑性基本理论

弹性力学是研究弹性体在约束和外载荷作用下应力和变形分布规律的一门学科。在弹性力学中针对微小的单元体建立基本方程，把复杂形状弹性体的受力和变形分析问题归结为偏微分方程组的边值问题。弹性力学的基本方程包括平衡方程、几何方程、物理方程。弹性力学的基本假定如下：完全弹性；连续；均匀；各向同性；小变形。弹性力学中的基本变量为体力、面力、应力、位移、应变。各自的定义如下。体力：是分布在物体体积内的力，例如重力和惯性力。面力：是分布在物体表面上的力，例如接触压力、流体压力。应力：物体受到约束和外力作用，其内部将产生内力，物体内某一点的内力就是应力。位移：就是位置的移动。物体内任意一点的位移用位移在 x、y、z 坐标轴上的投影 u、v、w 表示。应变：物体的形状改变可以归结为长度和角度的改变。各线段的单位长度的伸缩，称为正应变，用 ε 表示。两个垂直线段之间的直角的改变，用弧度表示，称为剪应变，用 γ 表示。物体内任意一点的变形，可以用 ε_x、ε_y、ε_z、γ_{xy}、γ_{yz}、γ_{zx} 六个应变分量表示。

如果所考虑的结构是一个等厚度薄板，即该结构在一个方向上的几何尺寸远远小于其余两个方向的几何尺寸，而且结构上承受的载荷均平行于板面，并沿板厚度方向均匀分布。由于板很薄，外力又不沿厚度变化，且应力沿板的厚度又是连续分布的，因此，在板内任何一点处，垂直于板面的应力分量很小，可近似等于零。再由剪应力互等定理可知，各节点的应力仅剩下板面内的三个分量。所以此类问题称为平面应力问题。

将每个点上的应力分解为一个正应力和两个剪应力（见图 2-1），分别与三个坐标轴平行。用六面体表面的应力分量来表示 p 点的应力状态。应力分量的下标约定如下：第一个下标表示应力的作用面，第二个下标表示应力的作用方向。τ_{xy}，第一个下标 x 表示剪应力作用在垂直于 X 轴的面上，第二个下标 y 表示剪应力指向 Y 轴方向。正应力由于作用表面与作用方向垂直，仅用一个下标。σ_x 表示正应力作用于垂直于 X 轴的面上，并指向 X 轴方向。应力分量的方向定义如下：如果某截面上的外法线沿着坐标轴的正

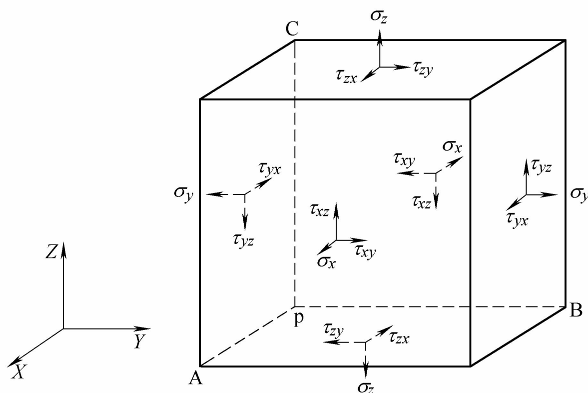


图 2-1　应力分解

方向，这个截面上的应力分量以沿坐标轴正方向为正；如果某截面上的外法线是沿坐标轴的负方向，这个截面上的应力分量以沿坐标轴负方向为正。根据剪应力互等定理有 $\tau_{xy}=\tau_{yx}$，$\tau_{yz}=\tau_{zy}$，$\tau_{zx}=\tau_{xz}$，则物体内任意一点的应力状态可以用六个独立的应力分量 σ_x、σ_y、σ_z、τ_{xy}、τ_{yz}、τ_{zx}来表示。

2.1.2　结构分析所使用的单元

从简单的杆单元和梁单元，一直到较为复杂的层合壳单元和大应变实体单元，绝大多数的 ANSYS 单元类型(见表 2-1)都可用于结构分析。

（1）静力分析　用于求解静力载荷作用下结构的位移和应力等。包括线性和非线性分析。非线性分析涉及塑性、应力刚化、大变形、大应变、超弹性、接触面和蠕变等。

（2）模态分析　用于计算结构的固有频率和模态。提供了不同的模态提取方法。

（3）谐波分析　用于确定结构在随时间正弦变化的载荷作用下的响应。

（4）瞬态动力分析　用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的响应，并且可计及上述静力分析中提到的所有的非线性特性。

（5）谱分析　谱分析是模态分析的扩展，用于计算由于响应谱或 PSD 输入(随机振动)引起的应力和应变。

（6）屈曲分析　用于计算屈曲载荷和确定屈曲模态。ANSYS 可进行线性(特征值)屈曲和非线性屈曲分析。

（7）显式动力分析　ANSYS/LS-DYNA 可用于计算高度非线性动力学问题和复杂的接触问题。

表 2-1　结构静力学中常用的单元类型

类　　别	形状和特性	单 元 类 型
杆	普通	LINK1，LINK8
	双线性	LINK10
梁	普通	BEAM3，BEAM4
	截面渐变	BEAM54，BEAM44
	塑性	BEAM23，BEAM24
	考虑剪切变形	BEAM188，BEAM189
管	普通	PIPE16，PIPE17，PIPE18
	浸入	PIPE59
	塑性	PIPE20，PIPE60
2-D 实体	四边形	PLANE42，PLANE82，PLANE182
	三角形	PLANE2
	超弹性单元	HYPER84，HYPER56，HYPER74
	黏弹性	VISCO88
	大应变	VISO106，VISO108
	谐单元	PLANE83，PLANE25
	P 单元	PLANE145，PLANE146

（续）

类　　别	形状和特性	单 元 类 型
3-D 实体	块	SOLID45，SOLID95，SOLID73，SOLID185
	四面体	SOLID92，SOLID72
	层	SOLID46
	各向异性	SOLID64，SOLID65
	超弹性单元	HYPER86，HYPER58，HYPER158
	黏弹性	VISO89
	大应变	VISO107
	P 单元	SOLID147，SOLID148
壳	四边形	SHELL93，SHELL63，SHELL41，SHELL43，SHELL181
	轴对称	SHELL51，SHELL61
	层	SHELL91，SHELL99
	剪切板	SHELL28
	P 单元	SHELL150

2.2　ANSYS 软件在应力场模拟中的应用实例

2.2.1　实例 1—平面静力学分析

图 2-2 所示的正方形薄板四周受均匀荷载的作用，该结构在边界上受正向分布压力$\bar{p}$ = 1kN/m，同时在沿对角线 y 轴上受一对集中压力，荷载为 2kN。若取板厚 $t=1\text{m}$，弹性模量 $E=1\times10^6\text{Pa}$，泊松比 $\mu=0$，基于 ANSYS 平台进行建模和分析。

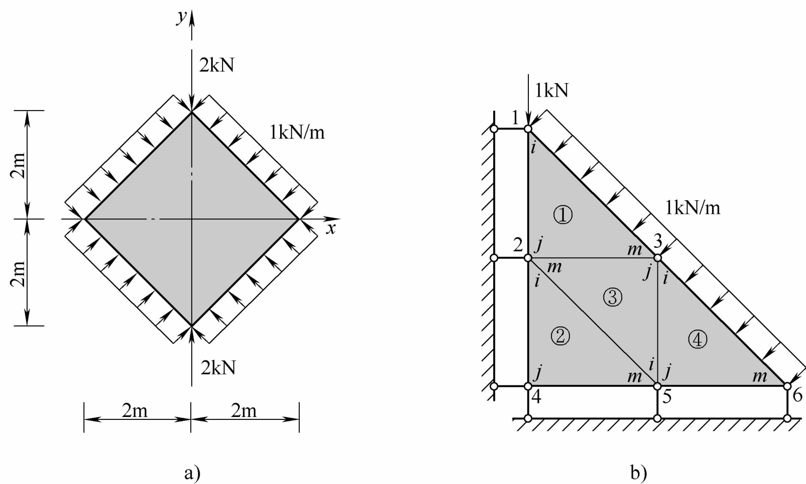


图 2-2　受均匀荷载作用的正方形薄板及有限元分析模型

a）受均匀载荷的正方形薄板　b）1/4 模型的单元划分

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex2-1
/prep7                              ! 进入前处理
antype,static                       ! 设定为静态分析
et,1,plane42                        ! 设置单元类型为 PLANE42
keyopt,1,3,3                        ! 设置为带厚度的平面问题
r,1,1                               ! 设置实常数,厚度为 1m
mp,ex,1,1e6                         ! 设置 1 号材料弹性模量为 1e6N/m2
mp,prxy,1,0                         ! 设置 1 号材料泊松比
n,1,,2                              ! 生成节点 1,坐标(0,2)
n,2,,1                              ! 生成节点 2
n,3,1,1                             ! 生成节点 3
n,4,                                ! 生成节点 4
n,5,1                               ! 生成节点 5
n,6,2                               ! 生成节点 6
mat,1                               ! 设定为材料 No. 1
type,1                              ! 设定单元 No. 1
real,1                              ! 设定实常数 No. 1
e,1,2,3                             ! 生成单元 1
e,2,4,5                             ! 生成单元 2
e,2,3,5                             ! 生成单元 3
e,3,5,6                             ! 生成单元 4
d,1,ux                              ! 1 号节点施加 x 方向约束
d,2,ux                              ! 2 号节点施加 x 方向约束
d,4,all                             ! 4 号节点施加全约束
d,5,uy                              ! 5 号节点施加 y 方向约束
d,6,uy                              ! 6 号节点施加 y 方向约束
nsel,s,,,1,3,2                      ! 选择 1 号 3 号节点
nsel,a,,,6                          ! 添加选择 6 号节点
sf,all,pres,1000                    ! 施加 1000N/m 压力
nsel,all                            ! 选择全部节点
f,1,fy,-1000                        ! 在 1 号节点施加 fy 方向的力(-1000N)
/solu                               ! 进入求解模块
solve                               ! 求解
finish                              ! 结束求解状态
! =====进入一般的后处理模块
/post1                              ! 进入后处理
pldisp,1                            ! 显示变形状况(见图 2-3)
finish                              ! 结束后处理
```

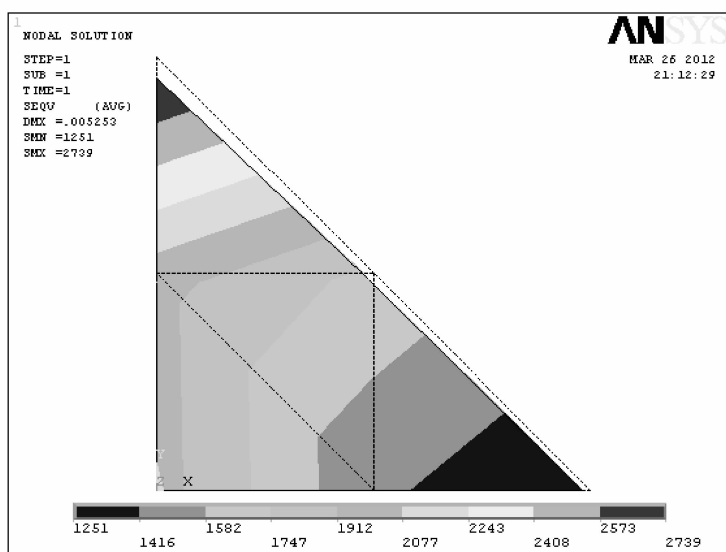


图 2-3　应力分布与变形

2.2.2　实例 2—立体三维静力学分析

8 万吨模锻液压机的中间牌坊主框架(将承受 4 万吨压力)的应力计算，将该中间牌坊简化为一个二维计算模型(见图 2-4)，并进行初步分析。参数取为，R_1 = 2.25m，R_2 = 4.5m，H = 17m，D = 3.4m(厚度)，取材料参数 $E = 2.1 \times 10^{11}$ Pa，$\mu = 0.3$，这里仅考虑工作状态，即在垂直方向上承受 400MN 的压力，则在上、下拱梁的内表面上有均布压力 $p = 4 \times 10^8 / (4.5 \times 3.4)$ Pa。

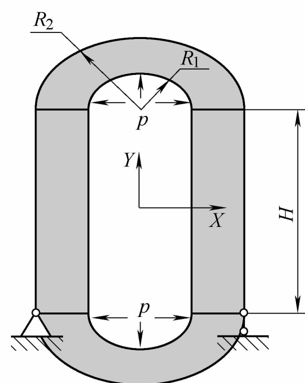


图 2-4　液压机主牌坊的几何及外载情况

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex2 -2
/prep7                                  ! 进入前处理
/plopts,date,0                          ! 设置不显示日期和时间
! = = = = =进行参数化建模的参数设置
beam _ R1 =2.25                         ! 设置拱梁的内半径
beam _ R2 =4.5                          ! 设置拱梁的外半径
stud _ H =17                            ! 设置立柱的高度
stud _ D =3.4                           ! 设置牌坊的厚度
e _ modu =2.1e11                        ! 弹性模量
prxy _ Poi =0.3                         ! 泊松比
line _ div1 =6                          ! 立柱短边划分单元份数
line _ div2 =40                         ! 立柱长边划分单元份数
arc _ div1 =20                          ! 拱梁圆弧划分单元份数
pressure =4e8/(4.5 * 3.4)               ! 工作载荷
```

```
! =====设置单元和材料
ET,1,PLANE42                                  ! 定义单元类型(PLANE42)
KEYOPT,1,3,3                                  ! 带厚度的平面应力问题
MP,EX,1,e_modu                                ! 定义弹性模量
MP,NUXY,1,prxy_Poi                            ! 定义泊松比
R,1,stud_D,                                   ! 设置实常数
! =====进行几何建模
! 基于几何参数定义上拱梁的 6 个关键点
K,1,-1*beam_R2,0.5*stud_H,,
K,2,-1*beam_R1,0.5*stud_H,,
K,3,beam_R1,0.5*stud_H,,
K,4,beam_R2,0.5*stud_H,,
K,5,0,beam_R2+0.5*stud_H,,
K,6,0,beam_R1+0.5*stud_H,,
! =====连接上拱梁的线,并生成上拱梁的面
L,1,2    $L,3,4                               ! 连接两点生成直线
LARC,1,4,5,beam_R2,                           ! 生成半径为 beam_R2 的半圆弧
LARC,2,3,6,beam_R1,                           ! 生成半径为 beam_R1 的半圆弧
AL,1,2,3,4                                    ! 选择线生成半圆环面
                                              ! 基于几何参数定义下拱梁的 6 个关键点
K,7,-1*beam_R2,-0.5*stud_H,,                  ! 定义关键点
K,8,-1*beam_R1,-0.5*stud_H,,
K,9,beam_R1,-0.5*stud_H,,
K,10,beam_R2,-0.5*stud_H,,
K,11,0,-1*(beam_R2+0.5*stud_H),,
K,12,0,-1*(beam_R1+0.5*stud_H),,
                                              ! 连接下拱梁的线,并生成下拱梁的面
L,7,8    $L,9,10                              ! 连接两点生成直线
LARC,7,10,11,beam_R2,                         ! 生成半径为 beam_R2 的半圆弧
LARC,8,9,12,beam_R1,                          ! 生成半径为 beam_R1 的半圆弧
AL,5,6,7,8                                    ! 选择线生成半圆环面
                                              ! 生成两个立柱
BLC4,-1*beam_R2,-0.5*stud_H,beam_R1,stud_H    ! 指定角点位置生成矩形
BLC4,beam_R1,-0.5*stud_H,beam_R1,stud_H       ! 指定角点位置生成矩形
Aglue,all                                     ! 让所有面间相互粘接
! =====进行单元划分
! 设置几何线上的单元划分几种分段
lsel,s,,,1  $lsel,a,,,2  $lsel,a,,,5  $lsel,a,,,6      ! 选择线
lesize,all,,,line_div1                        ! 设置被选线上的单元分段数
lsel,s,,,17  $lsel,a,,,18  $lsel,a,,,19  $lsel,a,,,20  ! 选择线
lesize,all,,,line_div2                        ! 设置被选线上的单元分段数
```

```
lsel,s,,,3  $lsel,a,,,4  $lsel,a,,,7  $lsel,a,,,8    ! 选择线
lesize,all,,,arc_div1                                ! 设置被选线上的单元分段数
MSHKEY,1                                             ! 采用映射划分网格方式
MSHAPE,0,2D                                          ! 指定单元形状为四边形
AMESH,all                                            ! 对所有的面划分网格
! 在求解模块中,施加位移约束、外力,进行求解
/solution
nsel,s,loc,x,-1*beam_R2                              ! 选择 X 坐标为 -1*beam_R2 的节点
nsel,r,loc,y,-0.5*stud_H                             ! 在选择 Y 坐标为 -0.5*stud_H 的节点
D,all,all                                            ! 对所选节点进行全约束
nsel,all                                             ! 再恢复选择所有节点
nsel,s,loc,x,beam_R2                                 ! 选择 X 坐标为 beam_R2 的节点
nsel,r,loc,y,-0.5*stud_H                             ! 选择 Y 坐标为 -0.5*stud_H 的节点
D,all,UY                                             ! 对所选节点约束 Y 向位移
SFL,4,PRES,pressure,                                 ! 在选择线 4 上施加均布压力 4e8/(4.5*3.4)Pa
SFL,8,PRES,pressure,                                 ! 在选择线 8 上施加均布压力 4e8/(4.5*3.4)Pa
/replot                                              ! 重画图形
Allsel,all                                           ! 选择所有信息(包括所有节点,单元和载荷等)
solve                                                ! 进行求解
! 进入一般的后处理模块
/post1                                               ! 后处理
/UDOC,1,CNTR,RIGH                                    ! 设定云图显示图标的位置(右边的中部)
plnsol,s,eqv,0,1                                     ! 显示等效应力云图(见图 2-5)
PLNSOL,U,SUM,0,1,0                                   ! 显示变形位移云图 (见图 2-6)
finish                                               ! 结束
```

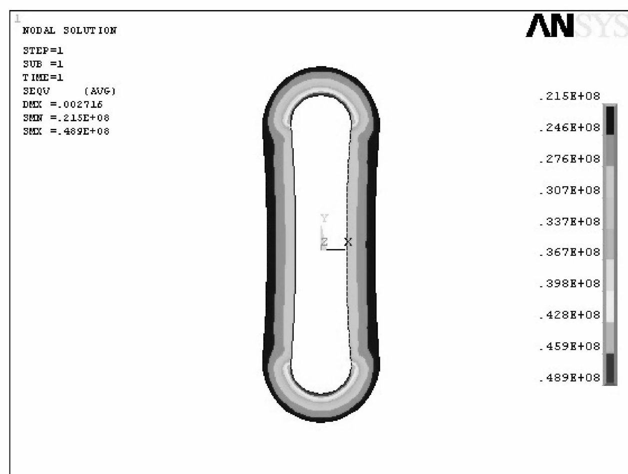


图 2-5　等效应力云图

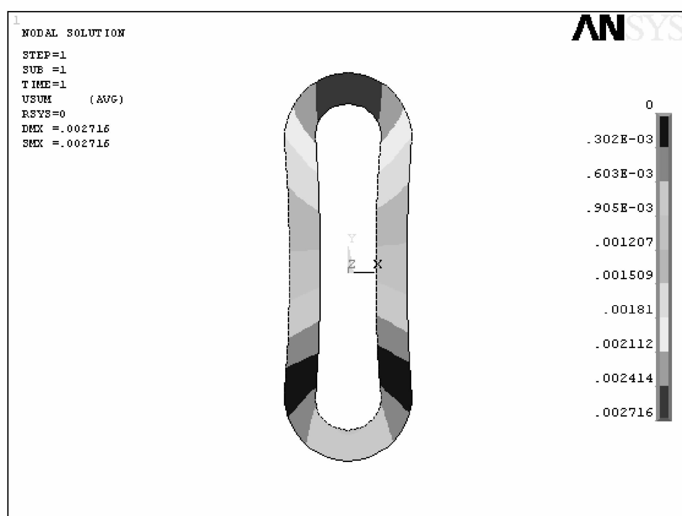


图 2-6 变形位移云图

2.2.3 实例 3—接触应力分析

一根圆柱形铁杆插入一个空心圆柱体，空心圆柱体空心的上端形状为锥形，下端为圆柱形且其半径大于圆柱形铁杆的半径。分析当铁杆插入后整体结构的应力分布。由于结构和荷载都具有轴对称性，我们取其截面进行轴对称分析。

材料特性：弹性模量为 68956.8MPa；泊松比为 0.32；摩擦系数为 0.2。

材料达到屈服极限后的应力—应变关系

应变	应力
0.0004495568	31
1.0004495568	292.2

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex2 -3
/prep7
/title,contact exercise
/pbc,u,1
et,1,182
keyopt,1,3,1
rectng,0,4,,30
rectng,3.5,30,-50,-15
k,9,4
k,10,30
l,9,8
l,10,9
l,7,10
lsel,s,,,7,11,2
```

```
lsel,a,,,10
al,all
lsel,s,,,2,4,2
lesize,all,,,10,1
lsel,s,,,1,3,2
lesize,all,,,3
lsel,s,,,5,7,2
lsel,a,,,10
lesize,all,,,6,1
lsel,s,,,9,11,2
lesize,all,,,5,1
lsel,s,,,6,8,2
lesize,all,,,10,1
amesh,all
lsel,s,,4,6,2
lsel,a,,,11
nsll,s,1
d,alll,ux
nsel,s,loc,y,-50
d,all,uy
nsel,s,loc,y,30
d,all,uy,-30
alls
save,cont,db
resume,cont,db
mp,ex,1,68956.8
mp,nuxy,1,0.32
tb,miso,1
tbpt,,0.0004495568,31
tbpt,,1.0004495568,292.2
/solu
antype,static
nlgeom,on
time,1
nsub,20,10000,20
outress,all,-20
finish
/prep7
mp,mu,1,0.2
r,2
real,2
et,2,169
et,3,172
```

```
keyopt,3,9,0
keyopt,3,12,0
lsel,s,,,8
lsel,a,,,9
cm,_target,line
type,2
nsll,s,1
esurf,all
lsel,s,,,2
cm,_contact,line
type,3
nsll,s,1
esurf,all                          !(见图 2-7)
allsel
finish
/solu
solve
```

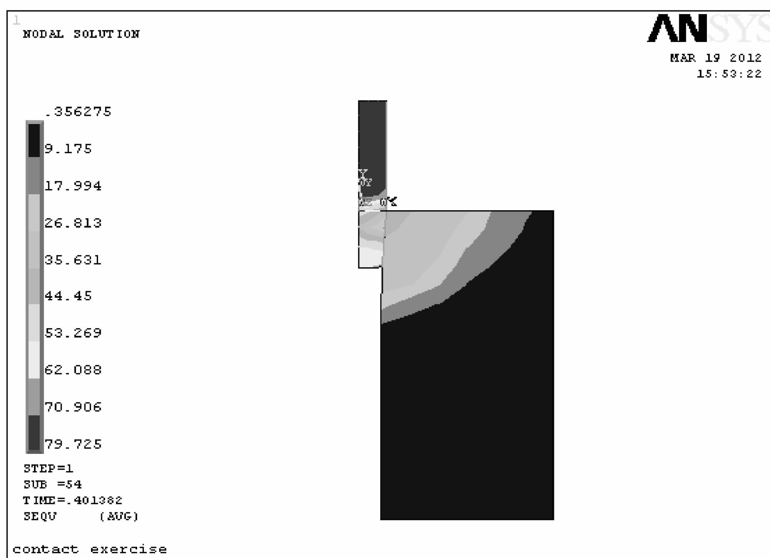


图 2-7 变形位移云图

2.2.4 实例 4—非线性动力学分析

子弹冲击刚性壁的非线性分析见图 2-8。一个子弹以给定的速度射向壁面，假定撞击过程不考虑摩擦，壁面假定是刚性无摩擦的。分析子弹和壁面接触后 80μs 长的变形过程，获得子弹的整个变形、速度历程，以及最大等效 VonMises 应变数据。参数单位制为 SI 单位。用轴对称单元模拟棒。最好能通过单一载荷步施加载荷，在载荷步中同时施加初始速度和约束。约束圆柱体末端节点的 Y 方向位移以模拟刚性墙壁。打开自动时间分步由 ANSYS 自动确定时间步长，分析结束的时间(time of end)为 8e-5s，以确保有足够长的时间来捕捉完整

的变形过程。所用材料、速度及几何参数如下：弹性模量 Ex = 117.0e09MPa；密度 DENS = 8930.0kg/m^3；泊松比 NUXY = 0.35；屈服强度 YieldStrength = 400.0e06MPa；剪切模量 TangentModulus = 100.0e06MPa；长 L = 32.4e − 3m；直径 D = 6.4e − 3m；初始速度是 227.0m/s。模拟为一个同圆柱体以速度 v 向墙壁撞击，材料先是弹性变形，然后是理想塑性变形。

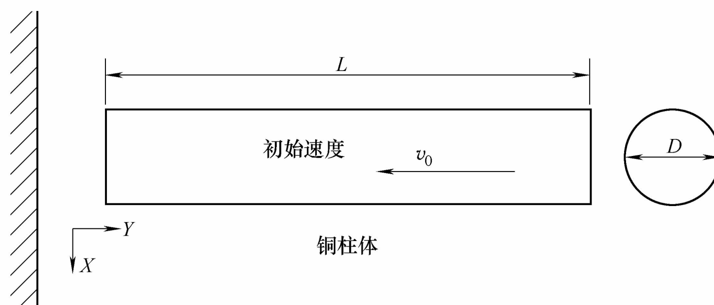


图 2-8　铜圆柱体图解

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex2 -4
/title,copper cylinder impacting a rigid wall
/prep7                                  ! 进入前处理
et,1,visco106                           ! 选择 visco106 单元
keyopt,1,3,1                            ! 轴对称问题
mp,ex,1,117e9                           ! 材料弹性模量
mp,DENS,1,8930                          ! 材料密度
mp,nuxy,1,0.35                          ! 泊松比
tb,biso,1,1,,0                          ! 设置 Bilinear 应力应变曲线
tbmodif,2,1,4e8                         ! 屈服强度
tbmodif,3,1,1e8                         ! 材料的剪切模量
tbplot,biso,1                           ! 显示材料应力应变曲线
rectng,0,0.0032,0,0.0324                ! 创建矩形
lesize,2,,,20,1                         ! 下面依次定义长和半径网格分数
lesize,1,,,4,1
mshape,0,2d                             ! 划分网格
mshkey,1
amesh,1
finish                                  ! 退出前处理
/solu                                   ! 进入求解状态
antype,4                                ! 瞬态分析
trnopt,full                             ! 设定求解方法为 Full
lumpm,o nlgeom,1                        ! 考虑大变形因素
ic,all,uy,,-227                         ! 定义初始速度
d,all,,0,,,,uz                          ! 下面定义约束
```

```
nsel,s,loc,x,0
d,all,,0,,,,ux
nsel,s,loc,y,0
d,all,,0,,,,uy
allsel
！约束定义完毕,设置求解选项
time,8e-5                          ！时间长度
autots,1                           ！打开自动时间步长设定
deltim,4.4e-7                      ！时间步长增量
kbc,1
outres,all,4                       ！输出所有子步结果
solve                              ！求解
finish                             ！退出求解
/post1                             ！进入通用后处理
set,last                           ！导入最后一步计算结果
top_node=26                        ！下面定义参数提取节点变形量
*get,deform,node,top_node ,u,y
/dscale,1,1                        ！下面显示应变
pldisp,2
plnsol,epto,eqv
finish
！退出通用后处理,进入时间—历程后处理,显示速度时间变化曲线(见图 2-9)
/post26
nsol, 2, top_node, u, y, displace
deriv, 3, 2, 1,, velocity,,, 1
/axlab, y, velocity
```

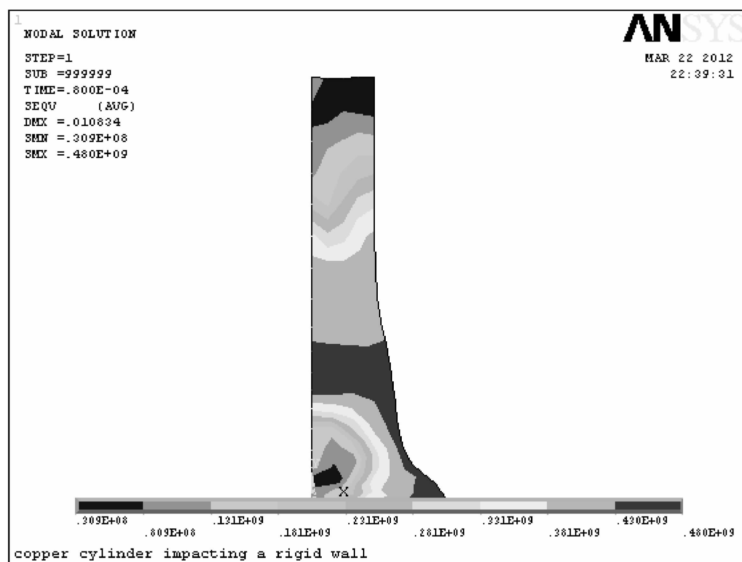


图 2-9 应力分布云图

```
plvar, 3
finish                                        ! 分析结束
```

2.2.5　实例 5—轮胎运动过程中的非线性动力学分析

如图 2-10 所示，采用非线性动力学分析轮胎运动过程的受力。计算结果见图 2-11。

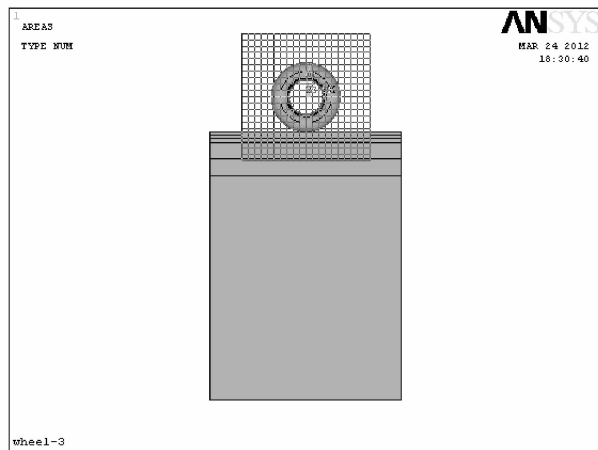


图 2-10　轮胎在公路上运动时的示意图

命令流如下：

```
/clear
/prep7
/filname,ex2 -5,1
/title,wheel -3
et,1,45                        ! 定义单元类型用来给土层、轮辋以及基层来划分网格
et,2,181                       ! 定义轮胎材料参数
mp,ex,1,8000e6                 ! 定义超弹材料,用 9 常数模型(单位为 MPa)
mp,prxy,1,0.4
mp,ex,2,1.03e10                ! 定义正交弹性材料(单位为 MPa)
mp,prxy,2,0.33
mp,ex,3,2.1e11
mp,prxy,3,0.3
save,material4,db
/prep7                         ! 定义道路几何参数
areaload =0.557800e6           ! 单位为 MPa
arearadiu =0.1066              ! 单位为 m
top =0.5493
thick1 =0.04 + top             ! 单位为 m
thick2 =0.06
thick3 =0.07
thick4 =0.25
thick5 =0.27
```

```
thick6 = 3.5
distanceofaxie = 1.5 * arearadiu              ! 两轮中心距
rightb = 1.50
leftb = -1.50
frontb = 1.50
backb = -1.50
depthb = -(thick1 + thick2 + thick3 + thick4 + thick5 + thick6)
ex1 = 1200e6                                  ! 单位为 MPa
prxy1 = 0.35                                  ! 定义道路材料参数
dens1 = 2.509e-03                             ! 单位为 kg/m3
ex2 = 1000e6
prxy2 = 0.35
dens2 = 2.447e-03
ex3 = 1000e6
prxy3 = 0.35
dens3 = 2.432e-03
ex4 = 1400e6
prxy4 = 0.2
dens4 = 2e-03
ex5 = 800e6
prxy5 = 0.2
dens5 = 1.800e-03
ex6 = 35e6
prxy6 = 0.4
dens6 = 1.900e-03
mp,ex,4,ex1                                   ! 定义道路材料参数,定义道路第一层材料参数
mp,PRXY,4,prxy1
mp,dens,4,dens1
mp,ex,5,ex2
mp,PRXY,5,prxy2
mp,dens,5,dens2
mp,ex,6,ex3
mp,PRXY,6,prxy3
mp,dens,6,dens3
mp,ex,7,ex4
mp,PRXY,7,prxy4
mp,dens,7,dens4
mp,ex,8,ex5
mp,PRXY,8,prxy5
mp,dens,8,dens5
mp,ex,9,ex6
mp,PRXY,9,prxy6
mp,dens,9,dens6
```

```
/prep7                                    ! 建立轮胎模型
k,1,0,0,0
k,2,0,0,0.03
k,3,0,0.01,0
k,4,0.297,0,0
k,5,0.297,0,0.2
k,6,0.297,0,-0.2
k,7,0.297,0,0.01
k,8,0.297,0,-0.01
k,9,2,0,0.01
k,10,0,0,-0.005
k,11,0,0,0.005
k,12,0.4028,0,0
k,13,0.5425,0,0
k,14,0.4028,0.01,0
circle,1,0.297,2,4,360,1
l,5,6
LGEN,2,4,,1,0.01
l,6,19
l,5,18
lsel,s,,,4,7,1
al,all
lsel,all
VDRAG,1,,,,,,1,2,3
vsel,s,,,1,3,1
vadd,all                                  ! 4
torus,0.4028,0.1362,0.1422                ! 1
torus,0.4028,0.1422,0.1465                ! 2
vsbv,2,4,sepo,dele,keep                   ! 3,5
vdele,3
vsbv,1,4,sepo,dele,keep                   ! 2,3
vdele,2
wpoffs,,,0.110836
WPSTYLE,,,,,,,,1
wpstyle,0.05,0.1,-1,1,0.003,0,0,,5
vsbw,4,speo,dele
vdele,2
wpoffs,,,-0.110836*2
vsbw,1,speo,dele                          ! 轮辋宽 0.11085
vdele,4
l,11,10                                   ! 40
circle,11,0.297,2,7,360,1
lsel,s,,,41,43,2
```

```
lsel,a,,,56
al,all                                    ! 11
lsel,all
vdrag,11,,,,,,40                          ! 1
vsel,s,,,1,2
vadd,all                                  ! 4
vsel,all
vglue,3,4,5                               ! 1 内胎,2 外胎,6 轮辋
HPTCREATE,area,11,,coord,0,0,0.005        ! 划分网格
HPTCREATE,area,73,,coord,0,0,-0.005
vsel,s,,,6
type,1
mat,3
mshape,1,3D
mshkey,0
esize,0.04
vmesh,all                                 ! 要粗化
vsel,all                                  ! 1336,1178
csys,0
HPTCREATE,area,21,,coord,0,0.5493,0       ! 给外轮胎划分网格
vsel,s,,,2
type,2
mat,1
mshape,1,3D                               ! 定义单元形状
mshkey,0
esize,0.02                                ! 定义为自由网格
vmesh,all                                 ! 可能要局部粗化
vsel,all
vsel,s,,,1                                ! 给轮胎束带层划分网格
type,2
mat,2
mshape,1,3D
mshkey,0
esize,0.02
vmesh,all                                 ! 可能要局部粗化
                                          ! 在内胎的内面上施加面载荷
asel,s,,,13,14
asel,a,,,67,70,1
nsla,s
SF,all,pres,0.63e6                        ! 压力单位为 Pa
csys,0
save,finimodel,db
/prep7
```

```
block,rightb,leftb,-top,-thick1,frontb,backb      !3!定义路面
block,rightb,leftb,-thick1,-(thick1+thick2),frontb,backb      !4
block,rightb,leftb,-(thick1+thick2),-(thick1+thick2+thick3),frontb,backb      !5
block,rightb,leftb,-(thick1+thick2+thick3),-(thick1+thick2+thick3+thick4),frontb,backb      !7
block,rightb,leftb,-(thick1+thick2+thick3+thick4),-(thick1+thick2+thick3+thick4+thick5),
frontb,backb      !8
block,rightb,leftb,-(thick1+thick2+thick3+thick4+thick5),depthb,frontb,backb      !9
vglue,3,4,5,7,8,9                          !3,10,11,12,13,14
vsel,s,,,3
type,1
mat,4
mshape,1,3D                                !定义单元形状
mshkey,0
esize,0.5                                  !定义为自由网格
vmesh,all
vsel,s,,,10
type,1
mat,5
mshape,1,3D                                !定义单元形状
mshkey,0
esize,0.15                                 !定义为自由网格
vmesh,all
vsel,s,,,11
type,1
mat,6
mshape,1,3D                                !定义单元形状
mshkey,0
esize,0.18                                 !定义为自由网格
vmesh,all
vsel,s,,,12
type,1
mat,7
mshape,1,3D                                !定义单元形状
mshkey,0
esize,0.2                                  !定义为自由网格
vmesh,all
vsel,s,,,13
type,1
mat,8
mshape,1,3D                                !定义单元形状
mshkey,0
esize,0.3                                  !定义为自由网格
vmesh,all
```

```
vsel,s,,,14
type,1
mat,9
mshape,1,3D                      ! 定义单元形状
mshkey,0
esize,0.5                        ! 定义为自由网格
vmesh,all
nsel,all
vsel,all
asel,all
finish
/solu
csys,0                           ! 给道路加约束
nsel,all
nsel,r,loc,y,depthb
d,all,all,0
nsel,all
nsel,r,loc,x,rightb
nsel,a,loc,x,leftb
d,all,ux,0
nsel,all
nsel,r,loc,z,frontb
nsel,a,loc,z,backb
d,all,uz,0
save,pavemodel,db
finish
/prep7
r,1001                           ! 加接触对
et,11,targe170
et,12,conta174
KEYOPT,12,2,1                    ! 定义使用罚函数
KEYOPT,12,12,1                   ! 定义为无限大,忽略滑动
KEYOPT,12,7,3                    ! 对下一个子步预测一个最小的时间增量
asel,s,,,22
asel,a,,,100,101
nsla,s
cm,_contact12,node
type,12
real,1001
esurf,,buttom
asel,s,,,9                       ! 目标面,选择较粗的网格
nsla,s
cm,_target12,node
```

```
type,11
real,1001
esurf,,top
save,contact,db
/solu
nsel,s,,,206
nsel,a,,,412
d,all,all,0
vsel,s,,,1,2
nsel,r,loc,x,0
d,all,ux,0
vsel,s,,,1,2
vsel,a,,,6
nsel,r,loc,z,0
d,all,uz,0
antype,static
asel,all
nsel,all
time,1
solve
```

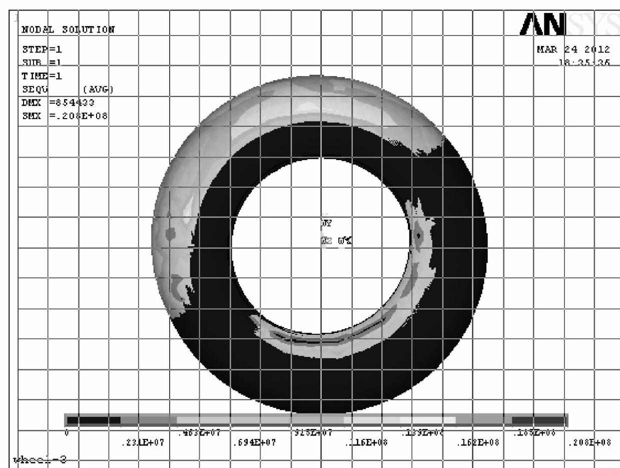


图 2-11　轮胎运动过程应力分布

2.2.6　实例 6—电触头接触应力分析

电触头的弹性模量为 206000Pa，泊松比为 0.35，摩擦系数为 0.16。电触头高为 5mm，宽为 0.45mm，接触面为两段弧长为 1.27mm(半径为 4mm)的弧连接而成。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex2-6,1
/title,contact spring analysis
```

```
/prep7
/view,1,1,1,1                    ! 调整窗口视角
et,1,plane42                     ! 定义单元
keyopt,1,1,0
keyopt,1,2,0
keyopt,1,3,3
keyopt,1,5,0
keyopt,1,6,0
mptemp,1,0                       ! 定义触头材料属性
mpdata,ex,1,,2.06e5              ! 弹性模量
mpdata,prxy,1,,0.35              ! 泊松比
mptemp,,,,,,,,                   ! 定义接触单元属性(摩擦系数)
mptemp,1,0
mpdata,mu,2,,0.16
r,1,2.5,                         ! 触头板厚
cyl4,,,4                         ! 建立触头模型
cyl4,-7.9458,-0.9291,4
lstr,2,4
lstr,6,8
lsel,s,line,,9
lsel,s,line,,10
asbl,1,11
asbl,2,12
ldele,4,5
adele,4,5                        ! 删除多余的面
k,14,0.45,0,0
k,1,0,5,0
k,2,-0.45,0,0
A,3,14,1,2,4,13
aadd,2,3                         ! 以上动触头模型建立完成
k,9,0,-0.45                      ! 建立静触头
k,6,0,-5.0
k,7,0.45,0,0
A,7,8,10,9,6
aadd,1,2                         ! 以上静触头模型建立完成
lsel,s,,1,10                     ! 触头网格密度控制
lsel,s,,13,14
lesize,all,0.04,,,,,,,1          ! 触头边网格密度为0.04
type,1                           ! 触头划分网格
mat,1
real,1
esys,0
secnum,
```

```
mshape,0,2d
mshkey,0
asel,s,,3,4
smrtsize,4
amesh,1,                              ! 触头划分网格完成
lsel,s,,,2,3                          ! 建立接触面及目标面,选择目标面并定义节点组
allsel,below,line
nsll,s,1
cm,target,node                        ! 选择目标面并定义节点组完成
lsel,s,,13,14                         ! 选择接触面并定义节点组
allsel,below,line
nsll,s,1
cm,contact,node                       ! 选择接触面并定义节点组完成
! 定义动触头与静触头接触对
/com,contact pair creation - start
cm,_nodecm,node
cm,_elemcm,elem
cm,_kpcm,kp
cm,_linecm,line
cm,_areacm,area
cm,_volucm,volu
/gsav,cwz,gsav,,temp
mp,mu,1,
mat,2
r,3
real,3
et,2,169
et,3,175
r,3,,,0.8,0.05,0,
keyopt,3,9,0
keyopt,3,10,1
rmore,
rmore,,0
rmore,0
nsel,s,,,target                       ! 产生目标对象
cm,_target,node
type,2
esln,s,0
esurf
cmsel,s,_elemcm
nsel,s,,,contact                      ! 产生接触面
cm,_contact,node
type,3
```

```
esln,s,0
esurf
allsel
esel,all
esel,s,type,,2
esel,a,type,,3
esel,r,real,,3
/psymb,esys,1
/pnum,type,1
/num,1
eplot
esel,all
esel,s,type,,2
esel,a,type,,3
esel,r,real,,3
cmsel,a,_nodecm
cmdel,_nodecm
cmsel,a,_elemcm
cmdel,_elemcm
cmsel,s,_kpcm
cmdel,_kpcm
cmsel,s,_linecm
cmdel,_linecm
cmsel,s,_areacm
cmdel,_areacm
cmsel,s,_volucm
cmdel,_volucm
/gres,cwz,gsav
cmdel,_target
cmdel,_contact
/com,contact pair creation - end                 ! 定义动触头与静触头接触对完成
! 设定求解步并求解
allsel,all
d,2,ux                                           ! 定义第一载荷步
dl,5,,,uy,-0.46455                               ! 定义动触头第一个行程
dl,7,,all,                                       ! 定义动触头第一个行程
finish
/solu
lswrite,1,                                       ! 定义第一载荷步完成
dl,5,,,uy,-0.9291                                ! 定义动触头第二个行程
dl,7,all
finish
/solu
```

```
lswrite,2,                              ! 定义第二载荷步完成
dl,5,,,uy,-1.2                          ! 定义动触头第三个行程
dl,7,all
finish
/solu
lswrite,3,                              ! 定义第三载荷步完成
/solu                                   ! 设定求解步并求解
antype,0
nlgeom,1
nsubst,6,0,0
outres,erase
outres,all,all
time,3
lssolve,1,3,1,                          ! 电触头接触应力分布(见图 2-12)
finish
```

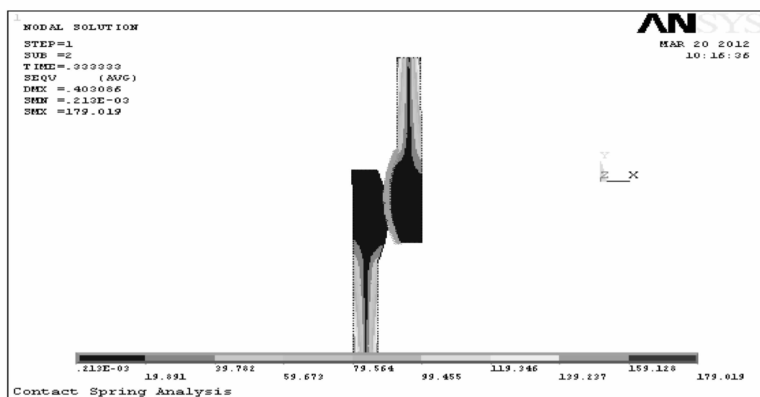


图 2-12　电触头接触应力分布

2.2.7　实例 7—冲击过程非线性分析

为研究装载时矿石对矿用载重车车厢的冲击作用，可以建立如图 2-13 所示的简略模型。由于冲击只作用于车厢底板，所以忽略掉车厢其余部分，车厢悬挂系统用弹簧模拟。现用有限元法分析矿石以一定的速度 v 撞击时车厢的应力、应变和变形，以研究车厢的强度、刚度特性。密度为 7800kg/m^3，弹性模量 EX = 2e11MPa，泊松比为 0.3，屈服强度为 2.4e8MPa，剪模量为 2e8MPa。

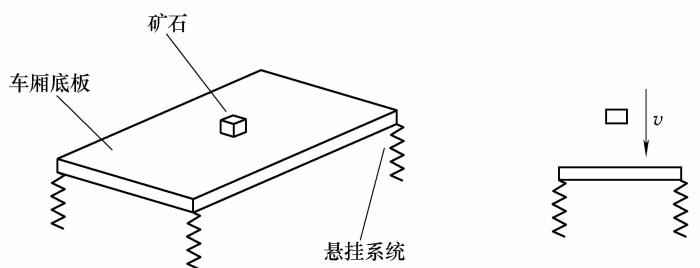


图 2-13　矿石对矿用载重车车厢的冲击示意图

命令流如下：

```
/clear                                    ! 清理目前所有 database 资料
/filname,ex2-7                            ! 定义文件名
/prep7                                    ! 进入前处理器
et,1,solid45                              ! 定义单元类型
et,2,shell43
et,3,combin14
et,4,conta173
et,5,targe170
mp,ex,1,2e11                              ! 定义材料(弹性模量)
mp,nuxy,1,0.3                             ! 定义材料(泊松比)
mp,DENS,1,7800                            ! 定义材料(密度)
! 定义材料非线性
tb,bkin,1,1
tbtemp,0                                  ! 给定温度
tbdata,,240e6,2e8                         ! 定义非线性属性(屈服极限、剪模量)
r,1,0.06                                  ! 定义实常数
r,2,100000
r,3,,,0.5
/view,1,1,1,1                             ! 改变观察视角
! 建模
k,1,-0.8,0,-1.5                           ! 创建关键点
k,2,-0.8,0,1.5
k,3,0.8,0,1.5
k,4,0.8,0,-1.5
a,1,2,3,4                                 ! 建立面
type,2                                    ! 设定单元类型
real,1                                    ! 设定实常数类型
esize,0.08                                ! 指定单元尺寸
amesh,1                                   ! 对面划分单元
block,-0.1,0.1,0.001,0.201,-0.1,0.1       ! 创建体
type,1                                    ! 设定单元类型
esize,0.05                                ! 设定单元尺寸
vmesh,1                                   ! 对体进行单元划分
n,950,-0.8,-0.5,-1.5                      ! 创建节点
n,951,0.8,-0.5,-1.5
n,952,0.8,-0.5,1.5
n,953,-0.8,-0.5,1.5
type,3                                    ! 设定单元类型
real,2                                    ! 设定实常数
e,1,950                                   ! 创建单元
e,60,951
e,40,952
```

```
e,2,953
! 设定约束
nsel,s,,,950,953,1                    ! 选择弹簧的固定端节点
d,all,all                             ! 对其进行全约束
allsel
nsel,s,loc,y,0                        ! 选择车厢底面上接触节点
nsel,r,loc,x,-0.3,0.3
nsel,r,loc,z,-0.3,0.3
! 创建接触的目标单元
! 指定单元属性
real,3                                ! 指定单元实常数
type,5                                ! 指定单元类型
esurf                                 ! 生成目标单元
alls
asel,s,,,4                            ! 选择矿石底面上的节点
nsla,s,1
real,3                                ! 指定单元属性
type,4
esurf                                 ! 生成接触单元
alls
finish                                ! 完成建模
/solu                                 ! 进入求解器
antype,trans                          ! 定义分析类型
acel,0,9.8                            ! 施加重力加速度
! 为矿石节点施加初速度
vsel,s,,,1                            ! 选择矿石上所有节点
nslv,s,1
ic,all,uy,,-8                         ! 指定初速度
d,all,ux                              ! 对矿石节点施加约束
d,all,uz
alls
kbc,0                                 ! 指定载荷方式(递增方式)
lnsrch,on                             ! 激活线性搜索
autot,on                              ! 设定自动时间步长
outres,all,all                        ! 设定输出内容
time,0.0013                           ! 指定载荷步结束时间
deltim,2.5e-5,1e-6,4e-5
solve                                 ! 求解
finish                                ! 完成求解
/post1                                ! 进入后处理器
plnsol,s,eqv,0,1.0                    ! 显示 von mises 应力(见图 2-14)
finish
```

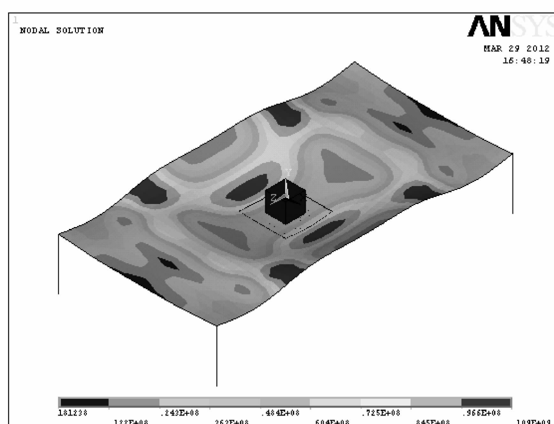


图 2-14 冲击过程应力分布

2.3 本章总结

通过本章的学习，可以懂得关于应力场的基本理论，还可以学会使用 ANSYS 软件对应力场模拟问题进行分析求解，并熟悉相应的操作步骤及相关命令。

2.4 练习题

1）计算分析图 2-15 所示模型（要求选择不同形状的截面分别进行计算）。

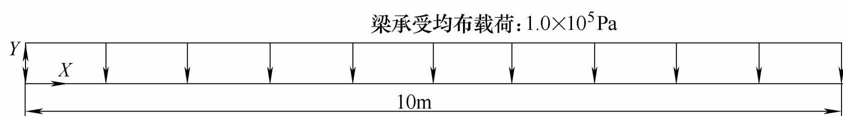


图 2-15 梁的计算分析模型

梁截面分别采用图 2-16 所示的三种截面（单位：m）。

2）一个厚 1m、边长 10m 的正方形膜，底端固定，顶端右侧角点受 $F_X=100$N 和 $F_Y=100$N 的集中力（见图 2-17），材料的弹性模量为 3.0×10^{11}Pa，试用有限元法进行静力分析。

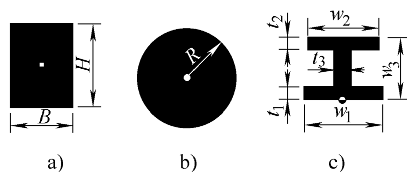


图 2-16 三种截面

a）矩形截面：$B=0.1$，$H=0.15$ b）圆截面：$R=0.1$ c）工字形截面：$w_1=0.1$，$w_2=0.1$，$w_3=0.2$，$t_1=0.0114$，$t_2=0.0114$，$t_3=0.007$

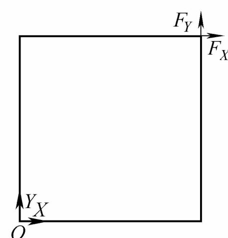


图 2-17 平面应力计算模型

3）A、B 两圆球相互接触，在 A 球的顶部施加集中力 F，F = 8000N，如图 2-18 所示，求球体内部的应力场、应变场分布。球体的几何参数及材料参数见表 2-2。

表 2-2　球体的几何参数及材料参数表

	弹性模量 E/GPa	泊松比	直径 ϕ/mm
A 球	220	0.27	20
B 球	69	0.3	30

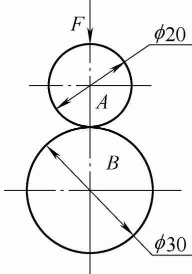


图 2-18　两圆球接触示意图(单位：mm)

分析：该问题属于线性静力学中的接触问题。对于这类球对称的问题，可以选取两球体横截面的四分之一建立有限元分析模型进行求解。

4）有一圆柱拉伸试样，其结构如图 2-19 所示。在其两端施加 100MPa 的均布拉伸应力，求试样在拉伸过程中内部各点的应力、应变场分布。该试样材料的弹性模量为 220GPa，泊松比为 0.3。

分析：该问题属于线性静力学问题。在分析过程中可以直接建立体模型进行求解，也可以根据轴的对称性，取其对称面建立有限元分析模型。

5）有一输气管道，管道内径为 1200mm，外径为 1600mm，其横截面结构如图 2-20 所示，输送气体压力为 0.5MPa，求管壁的应力场分布。管道材料弹性模量为 260GPa，泊松比为 0.26。

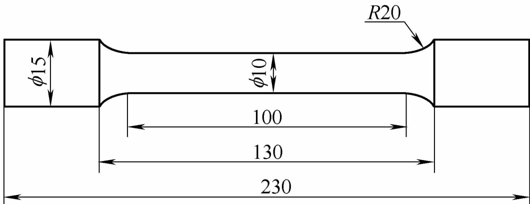


图 2-19　拉伸试样结构示意图(单位：mm)

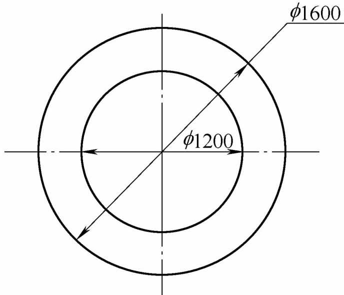


图 2-20　输气管道横截面结构示意图(单位：mm)

分析：管道沿长度方向尺寸较大，一般应远大于管道直径，该问题属于平面应变问题，可取其横截面的 1/4 建立有限元分析模型进行求解。

6）由工字钢构成的简支梁的支承和载荷分布如图 2-21 所示，参数见表 2-3。求支点反力、梁在中间截面处的最大应力和挠度。

表 2-3　相关参数

材料参数	几何参数	载　　荷
$E=200\text{GPa}$ $\mu=0.3$	$l=400\text{cm}$ $a=200\text{cm}$ $h=60\text{cm}$ $A=200\text{cm}^2$ $I_z=128000\text{cm}^4$	$W=2000\text{N/cm}$

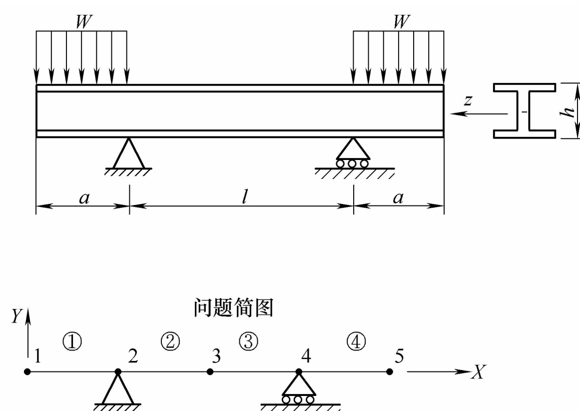


图 2-21　简支梁受力与划分网格示意图

7）有一 T 型梁，其结构如图 2-22 所示。现将其一端固定，在另一端上端面中心施加 5000N 的集中力 P，求此时 T 型梁内部的应力、应变场分布及挠度。该 T 型梁材料的弹性模量为 120GPa，泊松比为 0.26，梁的跨度为 1000mm。

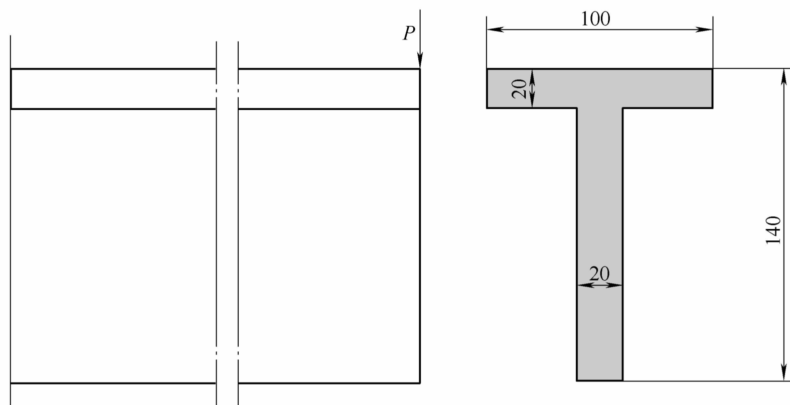


图 2-22　T 型梁结构示意图

分析：该问题属于线性静力学中梁的弯曲问题。由于该 T 型梁为非标准 T 型梁，同时要求求解梁内部的应力、应变场，因此在分析过程中需要建立体模型进行求解。

8）图 2-23 为内六角扳手的结构示意图，求在分别承受图示载荷 $F_1=50\text{N}$、$F_2=120\text{N}$ 作用下其内部的应力场、应变场及位移场。扳手材料的弹性模量和泊松比分别为 $E=220\text{GPa}$，$\mu=0.30$。

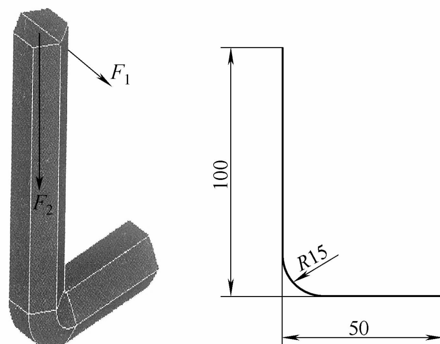


图 2-23　内六角扳手结构示意图

9）对一个盘轴紧配合结构进行接触分析（见图 2-24）。某转子中轴和盘的连接分析轴和盘的配合应力以及将轴从盘中拔出时盘轴连接处的应力情况。盘和轴用同一种材料，其性质如下：弹性模量为 2.1×10^5MPa；泊松比为 0.3；接触摩擦系数为 0.2。

10）如图 2-25 所示的结构，各杆的弹性模量和

横截面积都为 $E=29.5\times10^4\text{N/mm}^2$，$A=100\text{mm}^2$，基于 ANSYS 平台，求解该结构的节点位移、单元应力以及支反力。

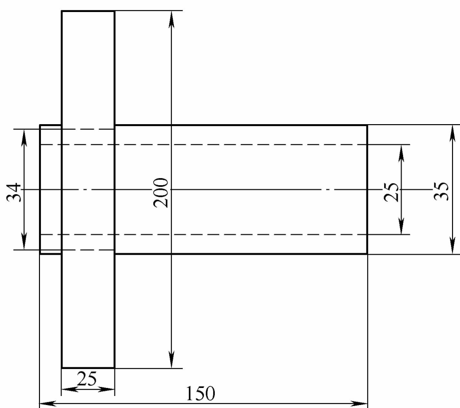


图 2-24　盘轴紧配合结构

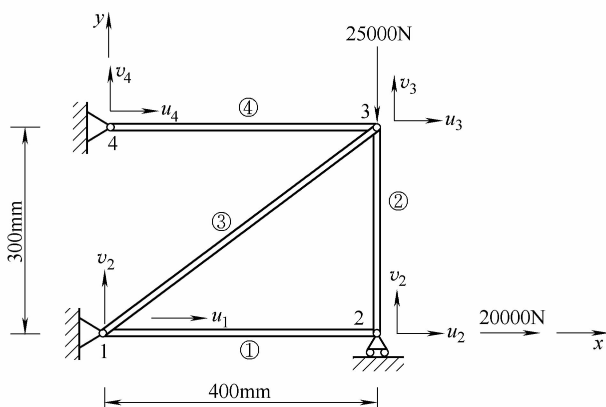


图 2-25　四杆桁架结构

11）考虑悬臂梁如图 2-26 所示，求 $x=L$ 处变形量。已知条件：弹性模量 $E=200\text{e}9\text{Pa}$；截面参数：$t=0.01\text{m}$，$w=0.03\text{m}$，$A=3\text{e}-4\text{m}^2$，$I=2.5\text{e}-9\text{m}^4$；几何参数：$L=4\text{m}$，$a=2\text{m}$，$b=2\text{m}$；边界外力 $F=2\text{N}$，$q=0.05\text{N/m}$。

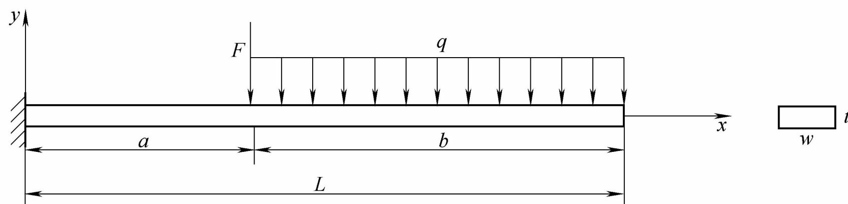


图 2-26　悬臂梁示意图

12）如图 2-27 所示，使用 ANSYS 分析平面带孔平板，分析在均布载荷作用下板内的应力分布。已知条件：$F=20\text{N/mm}$，$L=200\text{mm}$，$b=100\text{mm}$，圆孔半径 $r=20\text{mm}$，圆心坐标为 (100,50)，$E=200\text{GPa}$。板的左端固定。

13）一根直的细长悬臂梁见图 2-28，一端固定一端自由。在自由端施加载荷。本模型做特征值屈曲分析，并进行非线性载荷和变形研究。研究目标为确定梁发生支点失稳(标志

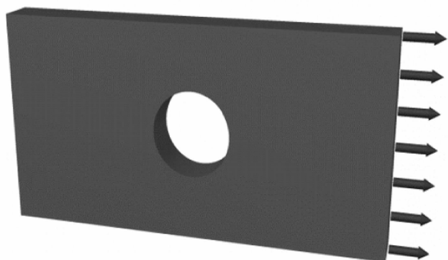


图 2-27　带孔平板模型

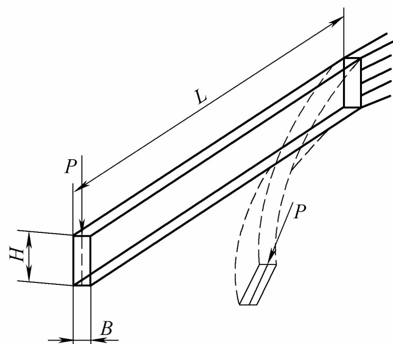


图 2-28　细长悬臂梁示意图

为侧向的大位移)的临界载荷。材料特性：弹性模量 = 10e4MPa；泊松比 = 0.1。几何特性：$L=100$mm；$H=5$mm；$B=2$mm。载荷为：$P=11$MPa。

14）本例对一个弹簧卡子进行接触分析(见图 2-29)，计算将卡头压进卡座和拉出卡座所需要的力。此问题属于需要输入厚度的平面应力问题，卡头和卡座的底板被认为是刚性的，因此在建模时不考虑。由于模型和载荷都是对称的，因此可用模型的右半部来进行计算。求解通过两个载荷步实现。材料性质：EX = 2.8e3(弹性模量)；NUXY = 0.3(泊松比)；MU = 0.2 (摩擦系数)。

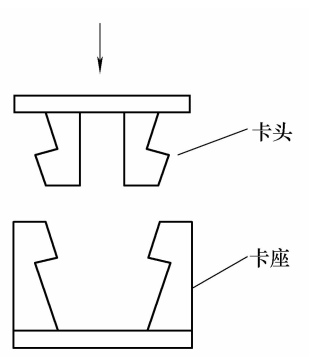


图 2-29　弹簧卡子接触示意图

15）图 2-30 为一矩形薄平板，在右端部受集中力 $F=100$kN 作用，材料常数为：弹性模量 $E=1\times10^7$Pa、泊松比 $\mu=1/3$，板的厚度 $t=0.1$m，在 ANSYS 平台上，按平面应力问题完成相应的力学分析。

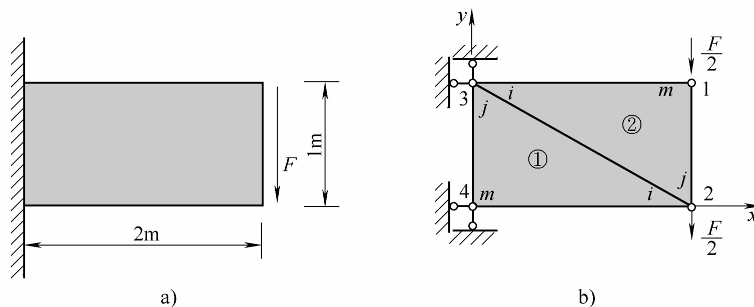


图 2-30　右端部受集中力作用的平面问题(高深梁)
a）问题描述　b）有限元分析模型

第 3 章　基于 ANSYS 软件的流场数值模拟

3.1　流场的基本理论与 FLOTRAN CFD 基本知识

流场在材料工程中的应用非常广泛，例如铸造、焊接生产，铸造的实质就是直接将液态金属浇入铸型并在铸型中凝固和冷却，进而得到铸件。液态金属的充型过程是铸件形成的第一个阶段。通过铸造过程流场模拟可以预测许多铸造缺陷(如卷气、夹渣、浇不足、冷隔及砂眼等)。把流体看做由无数没有微观运动的质点组成的没有空隙的连续体，并且认为表征流体运动的各物理量(例如密度、速度、压强等)在空间和时间上都是连续分布和连续变化的，这就是流场研究的连续介质模型。描述这个连续介质模型的微分方程如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{3-1}$$

动量守恒方程：

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+u\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+v\frac{\partial(\rho u)}{\partial y}+w\frac{\partial(\rho u)}{\partial z}=-\frac{\partial P}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)+\rho g_x\\
&\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+u\frac{\partial(\rho v)}{\partial x}+v\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+w\frac{\partial(\rho v)}{\partial z}=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)+\rho g_y\\
&\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+u\frac{\partial(\rho w)}{\partial x}+v\frac{\partial(\rho w)}{\partial y}+w\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=-\frac{\partial P}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)+\rho g_z
\end{aligned} \tag{3-2}$$

体积函数方程：

$$\frac{\partial F}{\partial t}+\frac{\partial(Fu)}{\partial x}+\frac{\partial(Fv)}{\partial y}+\frac{\partial(Fw)}{\partial z}=0 \tag{3-3}$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho cT)}{\partial t}+u\frac{\partial(\rho cT)}{\partial x}+v\frac{\partial(\rho cT)}{\partial y}+w\frac{\partial(\rho cT)}{\partial z}=\frac{\partial^2(\lambda_x T)}{\partial x^2}+\frac{\partial^2(\lambda_y T)}{\partial y^2}+\frac{\partial^2(\lambda_z T)}{\partial z^2}+\rho Q \tag{3-4}$$

式(3-1)到(3-4)式中，u、v、w 分别为 x、y、z 方向速度分量；ρ 为金属液密度；t 为时间；P 为金属液体内压力；μ 为金属液动力黏度；g_x、g_y、g_z 为 x、y、z 方向重力加速度；F 为体积函数，$0\leqslant F\leqslant 1$；c 为金属液比定压热容；T 为金属液温度；λ 为金属液热导率；ρQ 为热源项。

3.1.1　FLOTRAN CFD 模块介绍

ANSYS 程序中的 FLOTRAN CFD 分析功能是一个用于分析二维及三维流体流动场的先进工具，使用 ANSYS 中用于 FLOTRAN CFD 分析的 FLUID141 和 FLUID142 单元，可解决如下问题：作用于气动翼(叶)型上的升力和阻力；超音速喷管中的流场；弯管中流体复杂的三维流动。同时，FLOTRAN 还具有如下功能：计算发动机排气系统中气体的压力及温度分布；

研究管路系统中热的层化及分离；使用混合流研究来估计热冲击的可能性；用自然对流分析来估计电子封装芯片的热性能；对含有多种流体的(由固体隔开)热交换器进行研究。

FLOTRAN 可执行如下分析：层流或紊流；传热或绝热；可压缩或不可压缩；牛顿流或非牛顿流；多组分传输。这些分析类型并不相互排斥，例如，一个层流分析可以是传热的或者是绝热的，一个紊流分析可以是可压缩的或者是不可压缩的。

(1) 层流分析　层流中的速度场都是平滑而有序的，高黏性流体(如石油等)的低速流动通常就是层流。

(2) 紊流分析　紊流分析用于处理那些由于流速足够高和黏性足够低从而引起紊流波动的流体流动情况，ANSYS 中的二方程紊流模型可计及在平均流动下的紊流速度波动的影响。如果流体的密度在流动过程中保持不变或者当流体压缩时只消耗很少的能量，该流体就可认为是不可压缩的，不可压缩流的温度方程将忽略流体动能的变化和黏性耗散。

(3) 热分析　流体分析中通常还会求解流场中的温度分布情况。如果流体性质不随温度而变，就可不解温度方程。在共轭传热问题中，要在同时包含流体区域和非流体区域(即固体区域)的整个区域上求解温度方程。在自然对流传热问题中，流体由于温度分布的不均匀性而导致流体密度分布的不均匀性，从而引起流体的流动。与强迫对流问题不同的是，自然对流通常都没有外部的流动源。

(4) 可压缩流分析　对于高速气流，由很强的压力梯度引起的流体密度的变化将显著地影响流场的性质，ANSYS 对于这种流动情况会使用不同的解算方法。

(5) 非牛顿流分析　应力与应变率之间呈线性关系的这种理论并不足以解释很多流体的流动，对于这种非牛顿流体，ANSYS 程序提供了三种黏性模式和一个用户自定义子程序。

(6) 多组分传输分析　这种分析通常是用于研究有毒流体物质的稀释或大气中污染气体的传播情况，同时，它也可用于研究有多种流体同时存在(但被固体相互隔开)的热交换分析。

3.1.2 FLOTRAN 分析基础

1. FLOTRAN 单元的特点

ANSYS 中的 FLOTRAN 单元，即 FLUID141 和 FLUID142(见图 3-1)，用于解算单相黏性流体的二维和三维流动、压力和温度分布。FLUID141 单元具有下列特征：维数：二维；形状：四节点四边形或三节点三角形；自由度：速度、压力、温度、紊流动能、紊流能量耗散、多达六种流体的各自质量量所占的份额。FLUID142 单元具有下列特征：维数：三维；形状：四节点四面体或八节点六面体。

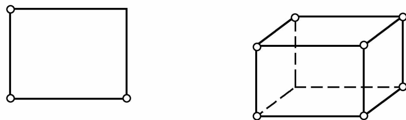


图 3-1　流场的基本单元
(FLUID141 单元,FLUID142 单元)

流体边界条件，包括速度、压力、紊流动能以及紊流能量耗散率。用户无需提供流场进口处紊流项的边界条件，因 FLOTRAN 对此提供的缺省值适用于绝大多数分析。

热边界条件，包括温度、热流、体积热源、热交换(膜)系数。

2. 使用 FLOTRAN 单元的一些限制及注意事项

FLOTRAN 单元的一些局限性：在同一次分析中不能改变求解的区域；单元不支持自由

流面边界条件；ANSYS 程序的某些特征不能同 FLOTRAN 单元一起使用；使用 FLOTRAN 单元时不能使用某些命令或菜单；当使用 ANSYS 的图形用户界面时，程序将只能显示那些在菜单和对话框中的 FLOTRANSetUp 部分要求了的特征和选项。

3.1.3　FLOTRAN 分析的主要步骤

一个典型的 FLOTRAN 分析有如下七个主要步骤：确定问题的区域；确定流体的状态；生成有限元网格；施加边界条件；设置 FLOTRAN 分析参数；求解；检查结果。

1. 确定问题的区域

用户必须确定所分析问题的明确范围，将问题的边界设置在条件已知的地方，如果并不知道精确的边界条件而必须做假定时，就不要将分析的边界设在靠近感兴趣区域的地方，也不要将边界设在求解变量变化梯度大的地方。有时，也许用户并不知道自己的问题中哪个地方梯度变化最大，这就要先做一个试探性的分析，然后再根据结果来修改分析区域。这些在后面章节中都有详述。

2. 确定流体的状态

用户在此需要估计流体的特征，流体的特征是流体性质、几何边界以及流场的速度幅值的函数。FLOTRAN 能求解的流体包括气流和液流，其性质可随温度而发生显著变化，FLOTRAN 中的气流只能是理想气体。用户须自己确定温度对流体的密度、黏性和热传导系数的影响是否很重要，在大多数情况下，近似认为流体性质是常数，即不随温度而变化，都可以得到足够精确的解。

3. 生成有限元网格

用户必须事先确定流场中哪个地方流体的梯度变化较大，在这些地方，网格必须做适当的调整。例如：如果用了紊流模型，靠近壁面的区域的网格密度必须比层流模型的大得多，如果太粗，该网格就不能在求解中捕捉到由于巨大的变化梯度对流动造成的显著影响，相反，那些长边与低梯度方向一致的单元可以有很大的长宽比。为了得到精确的结果，应使用映射划分网格，因其能在边界上更好地保持恒定的网格特性，映射划分网格可使用命令 MSHKEY，1。

4. 施加边界条件

可在划分网格之前或之后对模型施加边界条件，此时要将模型所有的边界条件都考虑进去，如果与某个变量相关的条件没有加上去，则该变量沿边界的法向值的梯度将被假定为零。求解中，可在重启动之间改变边界条件的值，如果需改变边界条件的值或不小心忽略了某边界条件，可无须重启动，除非该改变引起了分析的不稳定。

5. 设置 FLOTRAN 分析参数

为了使用诸如紊流模型或求解温度方程等选项，用户必须激活它们。诸如流体性质等特定项目的设置，是与所求解的流体问题的类型相关的，该手册的其他部分详细描述了各种流体类型所建议的参数设置。

6. 求解

通过在观察求解过程中相关变量的改变率，可以监视求解的收敛性及稳定性。这些变量包括速度、压力、温度、动能（ENKE 自由度）和动能耗散率（ENDS 自由度）等紊流量以及有效黏性（EVIS）。一个分析通常需要多次重启动。

7. 检查结果

可对输出结果进行后处理，也可在打印输出文件里对结果进行检查，此时用户应使用自己的工程经验来估计所用的求解手段、所定义的流体性质以及所加边界条件的可信程度。在 ANSYS 中进行的大多数流体分析都是通过多次中断和重启动来完成的，通常分析人员需要在各个重启动之间改变诸如松弛系数等参数或开关某些项(如求解温度方程的开关)。每当用户继续一个分析时，ANSYS 程序会自动将数据附加在所有的由 FLOTRAN 单元产生的文件中。下面将对 FLOTRAN 单元产生的所有文件进行说明：

1）结果文件，Jobname. RFL，包含节点结果。

2）打印文件，Jobname. PFL，包含各量的收敛记录及进/出口状态(如流量等)。

3）壁面文件，Jobname. RSW，包含壁面剪应力以及 Y-Plus 信息。

4）残差文件，Jobname. RDF，包含节点残差。

5）调试文件，Jobname. DBG，包含数学求解器的有关信息。

6）结果备份文件，Jobname. RFO，包含结果文件数据的一个拷贝。

7）重启动文件，Jobname. CFD，包含 FLOTRAN 的数据结构。

3. 2 ANSYS 软件的流体动力学分析实例

3. 2. 1 实例 1—三相流流动过程分析

三相混合气体 $O_2N_2H_2$ 如图 3-2 所示，在气体的三个入口，速度、温度、气体组成见表 3-1。

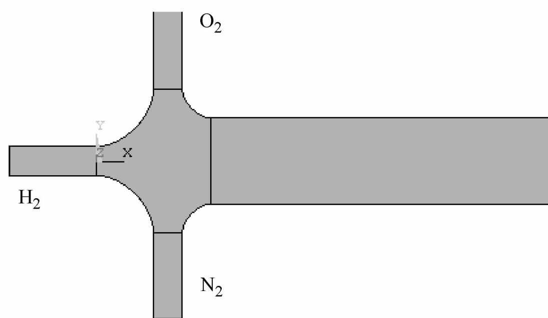


图 3-2 三相气体混合示意图

表 3-1 三个入口的情况

VX = 0	VX = 0. 1	VX = 0	O_2 = 1. 0	O_2 = 0. 0	O_2 = 0. 0
VY = −0. 1	VY = 0	VY = 0. 1	N_2 = 0. 0	N_2 = 1. 0	N_2 = 0. 0
TEMP = 300	TEMP = 400	TEMP = 300	H_2 = 0. 0	H_2 = 0. 0	H_2 = 1. 0

命令流如下：

```
/clear
/batch,list
```

```
/filname,ex3 -1
/com ** Analysis Types Laminar and Turbulent,Incompressible
/prep7                                    ! 定义几何尺寸,公制单位
lenin =.3
half = lenin/2.
width =.1
hfwid = width/2.
outlen =1.2
rect, -lenin,0, -hfwid,hfwid              ! 定义出口和入口几何形状
rect,.2,.3,.25,.25 +lenin
rect,.2,.3, -.25, -.25 -lenin
rect,.4,.4 +outlen, -.15,.15
l2tan, -3, -8                             ! 定义混合区域
l2tan, -6, -15
l2tan, -13, -10
l2tan, -12, -1
nlcurv =16                                ! 划分网格
rlcurv =1
nscurv =9
rscurv =1
nispan =8
rispan = -1.5
nospan =13
rospan = -2
nilen =10
rilen = -2
nolen =24
rolen =4
lsel,s,,,17,20,3
lesize,all,,,nlcurv,rlcurv
lsel,s,,,18,19
lesize,19,,,nscurv,rscurv
lsel,s,,,2,5,3
lsel,a,,,11
lesize,all,,,nispan,1
lsel,s,,,4,7,3
lsel,a,,,9
lesize,all,,,nispan,rispan
lsel,s,,,1,3,2
lsel,a,,,6,12,2
lesize,all,,,nilen,rilen
lsel,s,,,13,16
lesize,13,,,nolen,rolen
```

```
lesize,15,,,nolen,1./rolen
lesize,16,,,nospan,rospan
lesize,14,,,nospan,rospan
alls
a,2,12,11,13,16,6,5,3
alls
asel,s,,,5                                   ! 混合区域划分三角形网格
et,1,141
mshape,1,2d
amesh,5
asel,s,,,1,4
mshape,0,2d
mshkey,1
amesh,all
lsel,s,,,1,3,2                               ! 边界条件
lsel,a,,,6,12,2
lsel,a,,,13,17,2
lsel,a,,,18,20
nsll,,1
d,all,vx,0
d,all,vy,0
! 上部、底部、左边的速度和温度
vtop=.1
vbot=.1
vlef=.1
lsel,s,,,7
nsll
d,all,vx,0
d,all,vy,-vtop
nsll,,1
d,all,temp,300
lsel,s,,,4
nsll
d,all,vx,vlef
d,all,vy,0
nsll,,1
d,all,temp,400
lsel,s,,,9
nsll
d,all,vx,0
d,all,vy,vbot
nsll,,1
d,all,temp,300
```

```
lsel,s,,,14
nsll,,1
d,all,pres,0
flda,conv,iter,5
save
finish
alls
/solu
flda,iter,exec,40
flda,temp,nomi,300                    ! 初始温度为 300K
flda,prot,dens,air-si
flda,vary,dens,true
flda,prot,visc,air-si
flda,vary,visc,true
flda,prot,cond,air-si
flda,vary,cond,true
flda,prot,spht,air-si
save
solve
finish
/prep7
flda,prot,dens,cmix                   ! 混合气体的密度
flda,prot,visc,cmix                   ! 混合气体的黏度
keyopt,1,1,3
flda,solu,spec,t
transport
msdata,2
msspec,1,o2,31.999
msprop,1,DENS,GAS,1.2998,300,1.01325E+5
msvary,1,dens,t
msnomf,1,.3
msprop,1,VISC,CONSTANT,1.2067E-5
msprop,1,mdif,CONSTANT,2.149E-5
msprop,1,cond,CONSTANT,.02674
mscap,1,1
msspec,2,n2,28.018
msprop,2,DENS,GAS,1.1381,300,1.01325E+5
msvary,2,dens,t
msnomf,2,.3
msprop,2,VISC,CONSTANT,1.786E-5
msprop,2,mdif,CONSTANT,1.601E-5
msprop,2,cond,CONSTANT,.02598
mscap,2,1
```

```
msspec,3,h2,2.016
msprop,3,DENS,GAS,0.0819,300,1.01325E+5
msvary,3,DENS,t
msnomf,3,.4
msprop,3,VISC,CONSTANT,8.94E-6
msprop,3,mdif,CONSTANT,4.964E-5
msprop,3,cond,CONSTANT,.1815
mscap,3,1
msrelx,1,1.0
msrelx,3,1.0
msmeth,1,3
mssolu,1,,,2,1.e-8
msmeth,3,3
mssolu,3,,,2,1.e-8
alls
lsel,s,,,7
nsll,,1
d,all,o2,1.0
d,all,n2,0.0
d,all,h2,0.0
lsel,s,,,4
nsll,,1
d,all,o2,0.0
d,all,n2,1.0
d,all,h2,0.0
lsel,s,,,9
nsll,,1
d,all,o2,0.0
d,all,n2,0.0
d,all,h2,1.0
alls
flda,iter,exec,20
flda,conv,outp,land
save
finish
/solu
solve
flda,solu,temp,t                    ! 获得稳态的流场温度
flda,solu,flow,f
flda,meth,temp,3
flda,conv,temp,1.e-10               ! 收敛准则
flda,iter,exec,5
flda,relx,temp,1.0
```

```
solve
flda,iter,exec,35                          ! 获得流场(见图 3-3)和温度场的耦合求解
flda,solu,flow,t
solve
flda,iter,exec,50
save
solve
finish
```

3.2.2　实例 2—铸铁离心铸造流场分析

角速度为 1rad/s，如图 3-4 所示，弹性模量 $E=140\times10^3$ MPa，密度为 7.8×10^3 kg/m^2，求离心铸造流场内部的位移场分布。离心铸造模具的直径为 600mm，高度为 200mm。

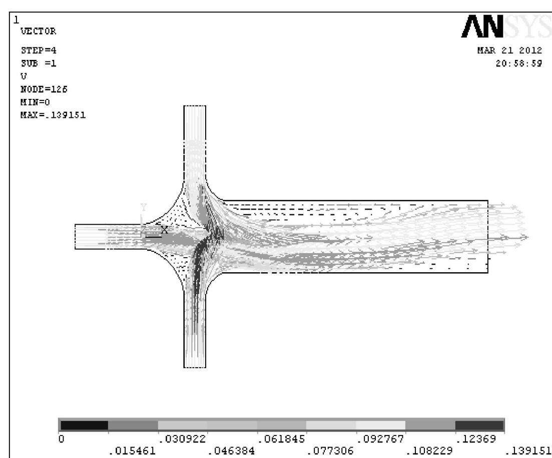


图 3-3　流场的流动速度矢量图

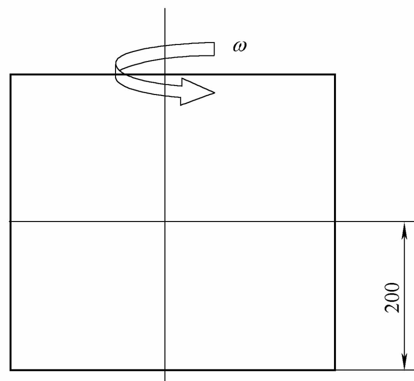


图 3-4　铸铁离心铸造示意图

命令流如下：

```
/clear
filname,ex3-2                              ! 定义工作文件名
/title,rotation of centrifugal casting of fluid   ! 定义工作标题
/prep7                                     ! 进入前处理器
et,1,fluid79                               ! 定义单元类型
keyopt,1,3,1                               ! 定义关键字
mp,ex,1,140e9                              ! 输入体积弹性模量
mp,DENS,1,7.8e3                            ! 输入密度
rectng,0,0.3,0,-0.2                        ! 生成矩形面
lsel,s,,,1,3,2                             ! 选择线段
lesize,all,,,12                            ! 设置线段等份数
lsel,s,,,2,4,2
lesize,all,,,10
amesh,1                                    ! 对面进行划分网格
/solu                                      ! 输入求解器
```

```
acel,,9.8                                ! 输入重力加速度
omega,,1                                 ! 输入角加速度
nsel,r,loc,x,0                           ! 选择 x 坐标为 0 的节点
nsel,a,loc,x,0.3                         ! 选择 x 坐标为 0.3 的节点
d,all,ux
allsel
nsel,r,loc,y,-0.2                        ! 选择 x 坐标为 -0.2 的节点
d,all,uy
allsel
solve                                    ! 开始求解
/post1                                   ! 进入 post1 后处理器
set,last
plnsol,v,x                               ! x 方向的位移场分布(见图 3-5)
plnsol,v,y                               ! y 方向的位移场分布(见图 3-6)
plnsol,u,,,,vect,,on                     ! 显示位移矢量图(见图 3-7)
finish
/exit,nosav                              ! 退出 ANSYS
```

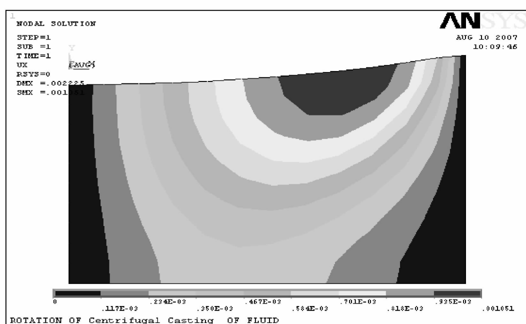


图 3-5 x 方向的位移场分布

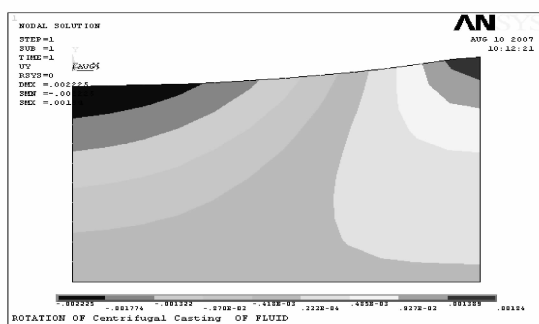


图 3-6 y 方向的位移场分布

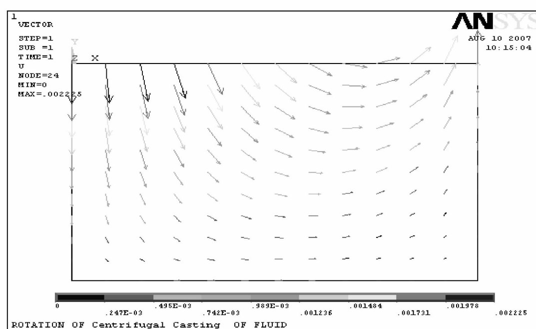


图 3-7 位移矢量图

3.2.3 实例 3—方形容器内流场分析

图 3-8 描述了一正方形空腔内流体流动情况，空腔的边界条件如图所示，几何尺寸

$L=0.03\text{m}$，雷诺数 $Ra=1.01\text{e}5$，工作环境 $T=173\text{K}$，$P=1.0135\text{e}5\text{Pa}$；流体特性：空气。

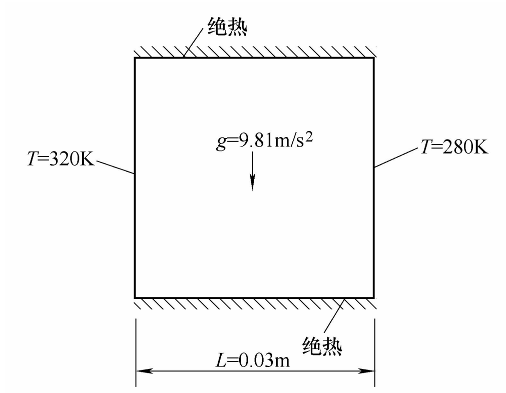


图 3-8　正方形空腔的边界条件

命令流如下：

```
/clear
title,buoyancy driven flow in a square cavity
/filname,ex3 -3                         ! 定义工作文件名
/prep7
et,1,fluid141                           ! 设置二维单元
rectng,,0.03,,0.03                      ! 方形区域
lplot
lesize,all, , ,25,1,0                   ! 定义单元划分尺度
amesh,1
eplot
nsel,s,ext                              ! 选择外界节点
nodes
d,all,,,,,,vx,vy
nsel,s,node,,1                          ! 施加左边界热条件
nsel,a,node,,52
nsel,a,node,,77,100
d,all,temp,320
nsel,s,node,,2                          ! 施加右边界热条件
nsel,a,node,,27,51
d,all,temp,280
nsel,all
esel,all
fldata1,solu,temp,1                     ! 打开流体热分析开关
fldata2,iter,exec,200
fldata2,iter,over,50
fldata5,outp,sumf,50
fldata13,vary,dens,1                    ! 定义流体属性
fldata7,prot,dens,air-si
```

```
fldata7,prot,visc,air-si
fldata7,prot,cond,air-si
fldata8,nomi,cond,-1
fldata7,prot,spht,air-si
acel,0,9.81,0                          ! 施加流体重力载荷
fldata18,meth,pres,1                   ! 定义求解控制
fldata19,tdma,pres,100
finish
/solu
solve                                  ! 求解
finish
/post1
set,last
plnsol,temp                            ! 求解温度场(见图 3-9)
plnsol,strm                            ! 显示流线图(见图 3-10)
/device,vector,1
plvect,v,,,,vect,elem                  ! 速度矢量图(见图 3-11)
finish
```

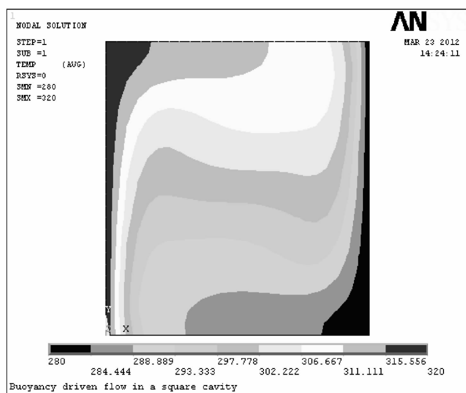


图 3-9 温度分布

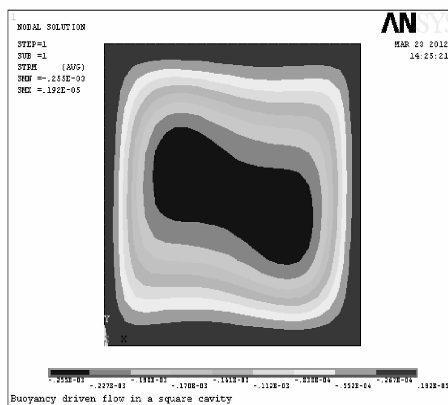


图 3-10 流线分布

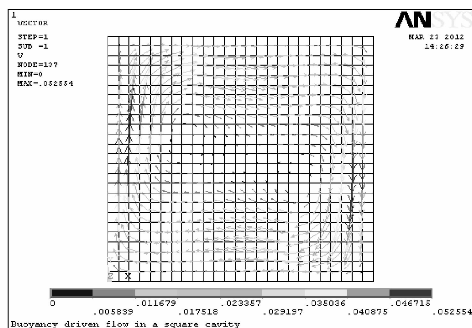


图 3-11 流动速度

3.2.4　实例 4—流体动力学分析

求解圆管中流体以及管壁的温度分布，考虑流体与管内壁的对流，管外壁与周围环境的对流。已知条件如下：

管内流体的物理属性以及入口条件

热导率	0.6W/(m · K)
密度	$1000kg/m^3$
比热容	4183J/(kg · K)
入口温度	20℃
入口流速	3m/s
壁管的物理属性和几何属性	
热导率	100W/(m · K)
管外径	7.65625mm
壁厚	2.0335mm
长度	294mm
管外对流条件	
环境温度	100℃
对流系数	$10000W/(m^2 \cdot K)$
管内对流条件	
对流系数	$15000W/(m^2 \cdot K)$

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex3 -4
/prep7
pi = acos( -1)                              ! 转换数据为 SI
ri = ((5/16) -0.083)*0.0254                 ! 管内半径
ro = (5/16) *0.0254                         ! 管外半径
l = 12 *0.0254                              ! 管长度
nthick = 1                                  ! 径向单元个数
size = (r0 - ri)/nthick                     ! 径向单元长度
nlength = nint(1/size)                      ! 长度方向单元个数
ktube = 100                                 ! 管热导率
kwater = 0.6                                ! 流体热导率
denswatr = 1000                             ! 流体密度
cwater = 4183                               ! 流体比热容
vinput = 3                                  ! 入口流速
carea = pi * (ri * *2)                      ! 流通面积
massflow = vinput * carea * denswatr        ! 质量流率
tinlet = 20                                 ! 流体入口温度
tbulk = 100                                 ! 管外环境温度
hi = 15000                                  ! 管内壁与流体的对流系数
ho = 10000                                  ! 管外壁对流系数
```

```
                                    ! 定义三类单元
et,1,116,1,1                        ! KEYOPT(1)=1 自由度为温度
                                    ! KEYOPT(2)=1 使用 SURF151 模拟管内对流
et,2,151,,,1,1,1                    ! KEYOPT(3)=1,轴对称
                                    ! KEYOPT(4)=1,无中间节点
                                    ! KEYOPT(5)=1,有额外节点,在 FLUID116 上
keyopt,2,8,2                        ! KEYOPT(8)=2,考虑对流
et,3,55,,,1                         ! KEYOPT(3)=1,轴对称
r,1,2*ri,carea,1                    ! FLUID116 的实常数
mp,KXX,1,kwater
mp,C,1,cwater
mp,DENS,1,denswatr
mp,KXX,3,ktube
k,1,0,0,0                           ! 建模
k,2,0,-1,0                          ! 注意不是-1,而是-L
k,3,0,-(1+size),0                   ! 注意不是-(1+size),而是-(L+size)
l,1,2
l,2,3                               ! 线 1 和 2 模拟管内流体流动
cm,waterlin,lines                   ! 创建组元,用于生成表面单元
rectng,ri,ro,0,-1                   ! 管壁,-L
type,1
real,1
mat,1
esize,,nlength
lmesh,1
esize,,1
lmesh,2
lsel,s,loc,x,(ri+ro)/2              ! 选择管两端
lesize,all,,,nthick                 ! 厚度方向单元个数
esize,,nlength                      ! 单元大小
type,3
mat,3
allsel,all
amesh,1
lsel,s,loc,x,ri                     ! 选择管内壁
cm,tubelin,lines
type,2
lfsurf,'tubelin','waterlin'         ! 使用宏 LFSURF 创建表面效应单元
/solu
dk,1,temp,tinlet                    ! 流体入口温度
lsel,s,loc,x,ro
sfl,all,conv,ho,,tbulk              ! 管外壁对流边界
esel,s,ename,,surf151
```

```
sfe,all,,conv,0,hi                    ! 管内壁对流系数
esel,s,ename,,fluid116
sfe,all,,hflux,,massflow              ! 管内流体质量流率,以热流密度方式加载
allsel,all
solve
finish
/post1
nsel,s,loc,x,0                        ! 选择 FLUID116
prnsol,temp                           ! 列出流体温度分布(见图 3-12)
nsel,s,loc,x,ro                       ! 选择管外壁节点
prnsol,temp                           ! 列出管外壁节点温度分布
finish
```

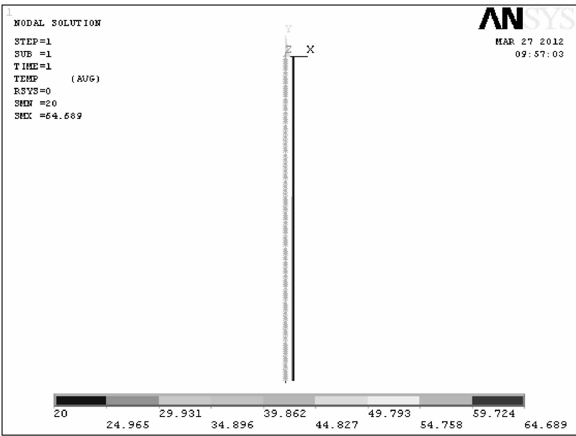


图 3-12　流体温度分布

3.3　本章总结

通过本章的学习，可以懂得关于流体的基本理论和数学模型，还可以学会使用 ANSYS 软件对流体层流和湍流问题进行分析求解，并熟悉相应的操作步骤及相关命令。可以了解 FLOTRAN 流体分析的基本知识，掌握 FLOTRAN 流体分析的基本步骤和需要注意的问题。

3.4　练习题

1）流体的连续介质模型是什么?

2）流场遵循的三大规律是什么？各自的表达方式是什么?

3）一个二维的导流管分析，先分析一个雷诺数为 600 的层流情况，然后改变流场参数再重新分析，最后再扩大分析区域来计算其湍流情况。该算例所用单位制为国际单位制。分析区域见图 3-13。

几何尺寸及流体性质

进口段长度	4m
进口段高度	1m
过渡段长度	2m
出口段高度	2.5m
层流分析时出口段长度	6m
湍流分析时出口段长度	12m
假设流体密度	$1kg/m^3$
假设流体黏性	第一次分析 0.01Pa·s;第二次分析 0.001Pa·s
空气密度	$1.205kg/m^3$
空气黏性	1.8135×10^{-5}Pa·s
进口速度	2.0m/s
出口压力	$0N/m^2$

4）机翼周围热流场分析，该算例是分析空气流速为 2m/s 时，一个机翼周围的热流场和机翼下表面的热流分布。机翼的建模，创建关键点为 1(0.9,1.2,0)，2(1.2,1.5,0)，3(2.2,1.2,0)，4(1.3,1.0,0)，使螺旋线模型连接 1、2、3，连接 1、4、3，创建机翼曲线，计算模型如图 3-14 所示。

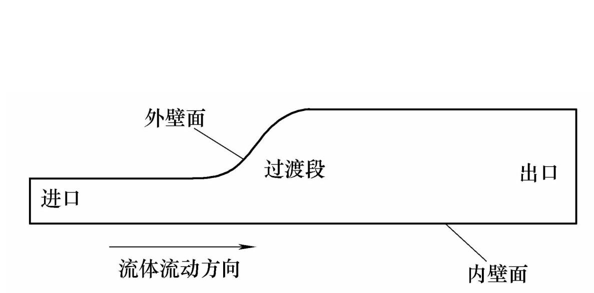


图 3-13　二维的导流管

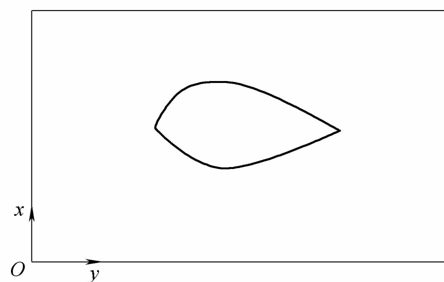


图 3-14　机翼周边的流场示意图

第 4 章　基于 ANSYS 软件的电磁场数值模拟

4.1　电磁场分析基本理论与 ANSYS 电磁场分析的基本知识

十九世纪以来，在社会生产力发展的推动下，电磁学得到了迅速的发展。理论的发展，促进了社会生产力的发展，特别是电工和通信技术的发展所建立的理论，为电磁学提供了必要的物质基础。电场分析就是要计算导电系统或电容系统的电场，需要计算的典型物理量有电场、电流密度、电荷密度、传导焦耳热。电场分析在工程设计中有广泛的应用，如汇流条、熔丝、传输线等。很多情况下，先进行电流传导分析，或者同时进行热分析，以确定因焦耳热而导致的温度分布；也可以在电流传导分析之后直接进行磁场分析以确定电流产生的磁场。ANSYS 以泊松方程为静电场分析的基础，主要的未知量(节点自由度)是标量电位(电压)，其他物理量由节点电位导出。稳态电流传导分析可以分析计算直流电流和电势差产生的电流密度和电位分布。可以进行电压和电流两种加载。稳态电流传导分析认为电压和电流呈线性关系，即电流与所加电压成正比。稳态电流传导分析要确定直流电或电动势导致的电流密度分布和电动势分布，在此分析中载荷有外加电压和电流两种类型。假定稳态电流传导分析是线性的，即电流与所加电压成正比。

1. 位移电流

只要有电动力作用在导体上，就会产生一个电流，作用在电介质上的电动力，使它的组成部分产生一种极化状态，有如铁的颗粒在磁力影响下的极性分布一样。在一个受到感应的电介质中，我们可以想象，每个分子中的电子发生移动，使得一端为正，另一端为负，但是依然和分子束缚在一起，并没有从一个分子移到另一个分子上去。这种作用对整个电介质的影响是在一定方向上引起的总位移。当电位移不断变化时，就会形成一种电流，其沿正方向还是负方向，由电位移的增大或减小而定。这就是麦克斯韦定义的位移电流的概念。

位移电流密度：
$$\vec{\delta}_d = \frac{d\vec{D}}{dt} \tag{4-1}$$

位移电流强度：
$$I_d = \frac{d\Phi_D}{dt} \tag{4-2}$$

全电流：
$$I = I_{传} + I_d \tag{4-3}$$

全电流(安培环路)定理：

$$\begin{cases} \oint_{S_1} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{传} \\ \oint_{S_2} \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_d \Rightarrow \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{传} + I_d \end{cases} \tag{4-4}$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_S \left(\vec{\delta} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \cdot d\vec{S} \tag{4-5}$$

在磁场中沿任意一个闭合回路 $\vec{H}$ 的线积分，在数值上等于穿过该闭合回路所围面积的传导电流和位移电流的代数和。

2. 麦克斯韦方程组的积分形式

静电场：$\vec{E}^{(1)}$，$\vec{D}^{(1)}$ 有源无旋。

变化磁场的电场：$\vec{E}^{(2)}$，$\vec{D}^{(2)}$ 无源有旋。

传导电流的磁场：$\vec{B}^{(1)}$，$\vec{H}^{(1)}$ 无源有旋。

位移电流的磁场：$\vec{B}^{(2)}$，$\vec{H}^{(2)}$ 无源有旋。

麦克斯韦方程组的积分形式：

$$\oiint_S \vec{D} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = \sum q_i$$

$$\oiint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0$$

$$\oint_L \vec{H} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = \oiint_S \left(\vec{\delta} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) \cdot \mathrm{d}\vec{S} \tag{4-6}$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{l} = -\oiint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E},\ \vec{B} = \mu \vec{H},\ \vec{\delta} = \gamma \vec{E}$$

加边界条件和初始条件，可解释所有的宏观电磁现象——电动力学。如电磁波的传播、反射、折射、干涉、衍射等。

3. 麦克斯韦方程组的微分形式

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{4-7}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{\delta} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

4. 电磁场分析的适用场合

电磁场分析可使用 ANSYS 的独立应用模块如 ANSYS/Emag 或 ANSYS/Multiphysics，ANSYS/University High 产品中也能进行电磁场分析。ANSYS 软件可用来分析与电磁场相关的多个方面问题，如电感、电容、阻抗、磁通量密度、磁场强度、磁通泄漏、涡流、电场分布、磁力线、特征频率、力和力矩、运动效应、电路和能量损失等。可有效地适用于下面各类设备的分析：电力发电机、磁带及磁盘驱动器、变压器、波导、螺线管传动器、谐振腔、电动机、开关、磁成像系统、天线辐射、图像显示设置传感器、滤波器、等离子体装置、回旋加速器、电解槽、磁悬浮装置。

ANSYS 磁场分析的有限元公式由磁场的麦克斯韦方程组导出，通过将标量势或矢量势等引入麦克斯韦方程组中并考虑其电磁性质关系，开发出适合于有限元分析的方程组。

ANSYS 软件的其他一些功能增强了软件的电磁分析能力和灵活性。例如，用户可方便地选择 MKS、CGS 或其他一些单位制作为电磁场分析的单位制。作为标准的 Frontal 求解器的替代者，PCG、ICCG 和 JCG 迭代求解器非常适用于求解电磁场问题，因为它们提供了电磁场分析问题的快速解法。使用二维和三维无限边界单元，则不需要建立环绕电磁设备的无限介质(如空气)的大模型，从而可以采用更小的模型，同时也降低了对计算机资源的需求。

ANSYS 软件提供了丰富的线性和非线性材料的表达方式，包括各向同性或正交各向异性的线性磁导率，材料的 B—H 曲线和永久性磁体的退磁曲线。后处理功能允许用户显示磁力线、磁通密度和磁场强度并进行力、力矩、源输入能量、感应系数、端电压和其他参数的计算。ANSYS 软件的电场分析功能可用于研究电场三个方面的问题：电流传导、静电分析和电路分析。感兴趣的典型物理量包括电流密度、电场强度、电势分布、电通量密度、传导产生的焦耳热、贮能、力、电容、电流以及电动势等等。

使用通用 ANSYS 程序进行电磁场有限元分析的主要优点之一是耦合场分析功能。磁场分析的耦合场载荷可被自动耦合到结构、流体及热单元上。此外，在对电路耦合器件的电磁场分析时，电路可被直接耦合到导体或电源上，同时也可计及运动的影响。

5. 电磁场分析中要计算的量

ANSYS 软件在电磁场分析中要计算的量主要有、磁通密度、磁场强度、磁力及磁矩、阻抗、电感、涡流、能量损耗、磁漏、S—参数、品质因子、反射波损耗、特征频率。

ANSYS 软件在电磁场分析中，其电磁场的来源有直流电流或外加电压、永久性磁体、外加磁场、运动导体。

6. ANSYS 软件中电磁场分析的类型

2-D 静态磁场分析：分析直流电流(DC)或永久性磁体所产生的磁场，用矢势法。

2-D 谐波磁场分析：分析低频交流电流(AC)或交流电压所产生的磁场，用矢势法。

2-D 瞬态磁场分析：分析随时间任意变化的电流或外场所产生的磁场，用矢势法。

3-D 静态磁场分析：分析直流电流或永久性磁体所产生的磁场，用基于单元边的方法或标势法。

3-D 谐波磁场分析：分析低频交流电流所产生的磁场，用基于单元边的方法。这种方法适用于大部分谐波磁场分析。

3-D 瞬态磁场分析：分析随时间任意变化的电流或外场所产生的磁场，用基于单元边的方法。这种方法适用于大部分瞬态磁场分析。

3-D 静态磁场分析：基于节点，用矢势法。

3-D 谐波磁场分析：基于节点，用矢势法。

3-D 瞬态磁场分析：基于节点，用矢势法。

7. 电磁场分析中的概念

(1) 自由度　有限元计算中的主自由度是磁势或磁通量，其他的磁场量都由这些主自由度给出。具体问题中的自由度可以是磁矢势、磁标势和磁通量，这要根据你所选择的单元类型和单元选项来选择。

(2) 标势法　对于大多数 3-D 静态分析建议使用标势法。在这种方法中可将电流源按“基元”建模，而不是单元，这样电流源可以不是有限元的一部分，只是在相应位置考虑它们对磁场的贡献。它不受模型其他部分的限制，建立模型更容易。

（3）矢势（MYP）法　矢势法是基于节点方法中的一种（标势法是另一种节点法）。在矢势法中，其节点自由度要比标势法多：AX、AY 和 AZ，即 X、Y 和 Z 方向的磁矢量势。在电磁耦合分析中还可以引入另外三个自由度：电流（CURR）、电动势（EMF）和电势（VOLT）。2-D 磁分析必须采用矢势法，此时主自由度只有 AZ。

在矢势法中，电流源（导电区域）要作为整个有限元模型的一部分。因为它的节点自由度更多，所以它的运算速度较慢。

矢势定义如下：$B=\nabla\times\boldsymbol{A}$，式中，$B$ 为磁通量密度，$\boldsymbol{A}$ 为磁矢势。

A 有 AX、AY、AZ 三个分量，在 2-D 平面分析和轴对称分析中只有 AZ 不为零，ANSYS 在每个有限元节点上求解 AZ，然后再据此计算其他场量，如磁通密度（B）。

（4）基于单元边分析　基于单元边方法只能用于 3-D 分析，对大多数 3-D 谐波分析和瞬态分析都推荐使用这种方法。基于单元边方法中的自由度与单元边有关系，而与单元节点没关系。它提供了 3-D 低频静态和动态电磁场的求解能力。

这种方法同基于节点的矢势法相比计算更精确，特别是当模型中有铁区存在的时候。但在下列情况下要用矢势法：当模型中存在着运动效应和电路耦合时；当模型要求电路和速度效应时；当模型中的单元存在着楔形退化时；当所分析的模型中没有铁区时。

（5）高频电磁分析　ANSYS 软件具有高频电磁分析功能，它能计算电磁场的传播特性和给定结构的波传播特性。大多数高频设备都采用电磁波信息，基于这种理由，在这些设备设计中，频率起着关键作用。当信息载波信号的波长与导波设备的大小相当时，就应做高频分析。ANSYS 具有“时间—谐波”和“模态高频”两种分析技术。

（6）电磁场单元概述　ANSYS 有很多可用于模拟电磁现象的单元，如下所示。

一维单元有 CIRCU124。

二维单元有 PLANE13、PLANE53、PLANE121、PLANE67、INFIN9、INFIN110。

三维单元有 SOURC36、SOLID96、SOLID97、INTER115、SOLID117、HF119、HF120、SOLID122、SOLID123、INFIN47、INFIN111、LINK68、SOLID69、SHELL157、SOLID5、SOLID62、SOLID98。电磁场单元见表 4-1。

表 4-1　电磁场单元

单元	维数	单 元 类 型	节点数	形　　状	自由度和其他特征
PLANE53	2-D	磁实体矢量	8	四边形	AZ；AZ-VOLT；AZ-CURR；AZ-CURR-EMF
SOURC36	3-D	电流源	3	无	无自由度，绕组、杆、弧型基元
SOLID96	3-D	磁实体标量	8	砖形	MAG（简化、差分、通用标势）
SOLID97	3-D	磁实体矢量	8	砖形	AX、AY、AZ、VOLT；AX、AY、AZ、CURR；AX、AY、AZ、CURR、EMF；AX、AY、AZ、CURR、VOLT；支持速度效应和电路耦合
INTER115	3-D	界面	4	四边形	AX、AY、AZ、MAG
SOLID117	3-D	低频棱边单元	20	砖形	AZ（棱边）；AZ（棱边）-VOLT
HF119	3-D	高频棱边单元	10	四面体	AX（棱边）
HF120	3-D	高频棱边单元	20	砖型	AX（棱边）
CIRCU124	1-D	电路	8	线段	VOLT、CURR、EMF；电阻、电容、电感、电流源、电压源、绞线圈、2-D 大线圈、3-D 大线圈、互感、控制源

（续）

单元	维数	单 元 类 型	节点数	形状	自由度和其他特征
PLANE121	2-D	静电实体	8	四边形	VOLT
SOLID122	3-D	静电实体	20	砖型	VOLT
SOLID123	3-D	静电实体	10	四面体	VOLT
SOLID127	3-D	静电实体	10	四面体	VOLT
SOLID128	3-D	静电实体	20	砖型	VOLT
INFIN9	2-D	无限边界	2	线段	*AZ*-TEMP
INFIN110	2-D	无限实体	8	四边形	*AZ*、VOLT、TEMP
INFIN47	3-D	无限边界	4	四边形	MAG、TEMP
INFIN111	3-D	无限实体	20	砖型	MAG、*AX*、*AY*、*AZ*、VOLT、TEMP
PLANE67	2-D	热电实体	4	四边形	TEMP-VOLT
LINK68	3-D	热电杆	2	线段	TEMP-VOLT
SOLID69	3-D	热电实体	8	砖型	TEMP-VOLT
SHELL157	3-D	热电壳	4	四边形	TEMP-VOLT
PLANE13	2-D	耦合实体	4	四边形	*UX*、*UY*、TEMP、*AZ*；*UX*-*UY*-VOLT
SOLID5	3-D	耦合实体	8	砖型	*UX*-*UY*-*UZ*-TEMP-VOLT-MAG；TEMP-VOLT-MAG；*UX*-*UY*-*UZ*；TEMP、VOLT/MAG
SOLID62	3-D	磁结构	8	砖型	*UX*-*UY*-*UZ*-*AX*-*AY*-*AZ*-VOLT
SOLID98	3-D	耦合实体	10	四面体	*UX*-*UY*-*UZ*-TEMP-VOLT-MAG；TEMP-VOLT-MAG；*UX*-*UY*-*UZ*；TEMP、VOLT/MAG

8. 电磁场的分析步骤

与其他有限元分析相类似，ANSYS 软件的电磁场分析主要由下列五个主要步骤组成：创建物理环境；建立模型、划分网格，赋予特性；加边界条件和载荷(励磁)；求解；后处理，查看计算结果。用户可以查看磁力线、磁力或力矩、绕组电阻或电感等，可以列表显示、图形矢量显示或等值线显示、沿路径显示和单元表数据计算等。

ANSYS/EMAG 能用于模拟工业电磁装置，电磁装置当然是三维的，但可简化为二维模型。模拟可考虑为：稳态、交流(谐波)时变瞬态、阶跃电压、PWM(脉宽调制)。利用轴对称衔铁和平面定子设计制动器的一个实例：衔铁旋转，衔铁气隙可变化，完整模型由 2 个独立部件组成(衔铁模块,定子模块)。

4.2　ANSYS 软件在电磁场模拟中的应用实例

4.2.1　实例 1—静态电磁场分析实例

图 4-1 所示为一个螺线管制动器的结构图(尺寸单位为 cm)，以 2-D 轴对称模型进行分

析。假定绕组电流较小，铁心没有达到饱和，只需进行一次线性迭代分析。一般情况下，要为模型周围的空气建模，以正确反映磁漏现象。为了简化分析，这里不考虑模型周围的磁漏，即不为周围的空气建模，只需在模型外表面加磁力线平行边界条件。

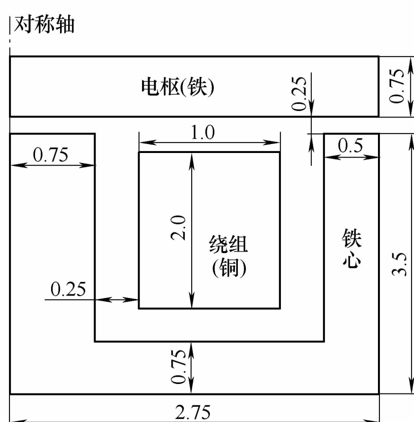


图 4-1 电磁制动器示意图

其相关参数如下：

绕组匝数：$n=650$(匝)，电流：$I=1.0$(A)。

材料特性如下：

空气的磁导率为：1；电枢有磁导率为：2000；铁心的磁导率为：1000；绕组的磁导率为：1。

在后处理中，用麦克斯韦应力张量方法和虚功方法分别处理转子的受力，还可得到磁场强度及绕组电感等数据。其具体详细的 GUI 操作方式和命令流操作方式如下。

命令流如下：

```
/clear
/batch
/filname, ex4-1, 1                              ! 定义工作文件名
/title, 2-d solenoid actuator static analysis   ! 定义工作标题 keyw, magnod, 1
/com, preferences for gui filtering have been set to display:
/com, magnetic-nodal                            ! 指定磁场分析
/prep7
et, 1, plane53                                  ! 指定单元类型
keyopt, 1, 3, 1                                 ! 指定分析类型为轴对称
mpdata, murx, 1,, 1                             ! 定义空气的材料特性
mpdata, murx, 2,, 1000                          ! 定义铁心的材料特性
mpdata, murx, 3,, 1                             ! 定义绕组的材料特性
mpdata, murx, 4,, 2000                          ! 定义电枢的材料特性
*set, n, 650                                    ! 绕组的匝数
*set, i, 1                                      ! 绕组每匝中的电流
*set, ta, 0.75                                  ! 模型参数尺寸
*set, tb, 0.75
*set, tc, 0.5
*set, td, 0.75
*set, wc, 1
*set, hc, 2
*set, gap, 0.25
*set, space, 0.25
*set, ws, 1.5
*set, hs, 2.75
*set, w, 2.75
```

```
*set, hb, 3.5
*set, h, 4.5
*set, acoil, wc*hc                          ! 绕组的横截面积
*set, jdens, n*i/acoil                      ! 电流密度
save
rectng,, w,, tb,                            ! 生成几何模型
rectng,, w, tb, hb,
rectng, ta, ta+ws, 0, h,
rectng, ta+space, ta+wc+space, tb+space, hc+tb+space,
/pnum, area, 1
aplot
aovlap, all
save
rectng, 0, w, 0, hb+gap,
rectng, 0, w, 0, h,
aplot
aovlap, all
numcmp, all                                 ! 压缩编号
/replot
save, ex4-1, db,                            ! 保存几何模型到文件
save
asel, s, area,, 2                           ! 给绕组区赋予材料特性
aatt, 3, 1, 1, 0
asel, s, area,, 1                           ! 给电枢区赋予材料特性
asel, a, area,, 12, 13
aatt, 4, 1, 1, 0
asel, s, area,, 3, 5                        ! 给铁心区赋予材料特性
asel, a, area,, 7, 8
aatt, 2, 1, 1, 0
pnum, mat, 1                                ! 打开材料编号
/replot
allsel, all
smrtsize, 4                                 ! 设置智能化划分网格等级
amesh, all                                  ! 划分自由网格
save, ex4-1_mesh, db,                       ! 保存网格单元数据到文件
save
esel, s, mat,, 4                            ! 选择电枢的所有单元
cm, arm, elem                               ! 生成一个组件
finish
/solu
fmagbc, arm                                 ! 给电枢加力边界条件
allsel, all
finish
```

```
/prep7
arscale, all,,, 0.01, 0.01, 1,, 0, 1          ! 改变单位制为 mks 单位（m）
finish
/solu
esel, s, mat,, 3                              ! 选择绕组区单元
bfe, all, js, 1,,, jdens/(0.01 * *2)          ! 加电流密度载荷
allsel,all
nsel,all
nsel,s,ext                                    ! 选择外层单元
d,all,az,0                                    ! 加磁力线平等边界条件
allsel,all
magsolv,0,3,0.001,,25                         ! 求解并运行
save
save, ex4 - 1 _ resu,db                       ! 保存计算结果
finish
/post1
plf2d,27,0,10,1                               ! 画磁力线图(见图 4-2)
fmagsum,'arm'                                 ! 对电磁力求和
/vscale,1,1,0
plvect,b,,,,vect,elem,on,0                    ! 画出磁通量密度矢量(见图 4-3)
plnsol,b,x,0                                  ! 画出磁能量密度的等值线
finish
/exit,nosav
```

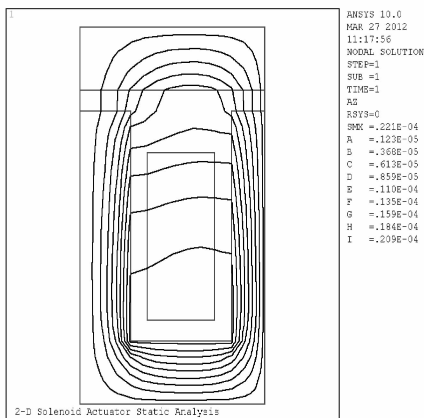


图 4-2　磁力线图

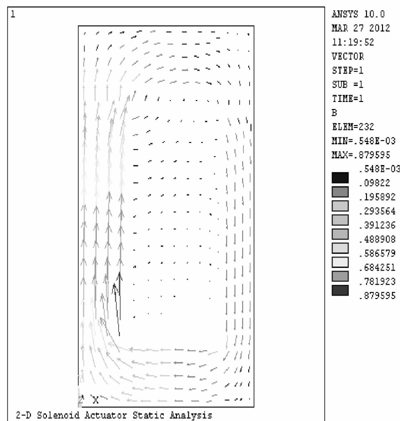


图 4-3　磁通量密度矢量图

4.2.2　实例 2—瞬态感应加热分析实例

本实例展示了一个瞬态感应加热问题。该问题演示了顺序求解谐波电磁分析及有重启动的瞬态传热分析。长钢坯通过感应绕组经历表面加热导致快速升温的过程。绕组紧贴钢坯表面放置并通过高频交变大电流。AC 交流电感应加热钢坯，最显著的是表面，其温度快速升

高。简化的模型只考虑长钢坯的有限长度，将图 4-4 简化为一维问题进行研究。对称的一维对称感应加热，边界条件和相关几何条件见图。求工件 3s 后表面和心部的温度以及温度场。

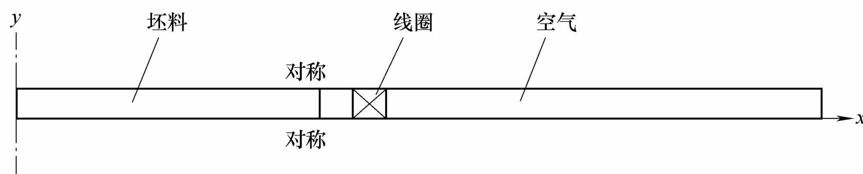


图 4-4　对称的一维对称感应加热

钢坯将加热到 700℃。对热问题及电磁场问题必须考虑温度相关的材料属性。必须顺序求解该问题。首先做一个交流谐波电磁场分析，然后做一个瞬态热分析。而且，必须在不同时间间隔重复电磁分析来校正影响求解温度的相关属性及对钢坯的热载荷。感应加热问题求解步骤如下。

步骤 1：建立属性关系，对模型区域定义的属性关系见表 4-2。

表 4-2　物理环境属性

区　　域	类　　型	材　　料	实　常　数
钢坯	1	2	1
绕组	2	3	1
空气	2	1	1
钢坯表面	3	2	3

步骤 2：建立整个区域的模型。对不同区域分配属性(钢坯表面用于定义热辐射用的表面效应单元,与实体区域的处理不同)。

步骤 3：创建电磁物理环境，通过定义表 4-3 所示的单元类型及材料属性定义电磁物理环境。

表 4-3　电磁物理环境

区　　域	类　　型	材　　料	实　常　数
钢坯	PLANE13	MURX(T)，RSVX(T)	None
绕组	PLANE13	MURX	None
空气	PLANE13	MURX	None
钢坯表面	NULL Type(0)	None	None

将单元类型由电磁改变为热类型，设置 KEYOPT 选项。在空气及绕组区域定义零单元类型(假定只考虑钢坯的热交换分析)，见表 4-4。

表 4-4　热物理环境

区　　域	类　　型	材　　料	实　常　数
钢坯	PLANE55	KXX(T)，ENTH(T)	None
绕组	NULL Type(0)	None	None
空气	NULL Type(0)	None	None
钢坯表面	SURF151	EMIS	斯蒂芬—玻耳兹曼常数

命令流如下：

```
/clear
/filname, ex4-2                                          ! 定义工作文件名
/title, Induction heating of a solid cylinder billet
/prep7
shpp, off
/com,
/com,
row=.015                                                 ! 工件外圆半径
ric=.0175                                                ! 绕组的内半径
roc=.0200                                                ! 绕组的外半径
ro=.05                                                   ! 模型的外径
t=.001                                                   ! 模型厚度
freq=150000                                              ! 频率(Hz)
pi=4*atan(1)                                             ! pi
cond=.392e7
muzero=4e-7*pi
mur=200
skind=sqrt(1/(pi*freq*cond*muzero*mur))                  ! 感应深度
ftime=3                                                  ! 最终时间
tinc=.05                                                 ! 分析步长
time=0                                                   ! 初试时间
delt=.01
! 电磁场模块
et,1,53,,,1                                              ! 单元
et,2,53,,,1
emunit,mks                                               ! 单位
mp,murx,1,1                                              ! 空气相对渗透率
mp,murx,3,1                                              ! 绕组相对渗透率
mptemp,1,25.5,160,291.5,477.6,635,698
mptemp,7,709,720.3,742,761,1000
mpdata,murx,2,1,200,190,182,161,135,104                  ! 钢的相对渗透率
mpdata,murx,2,7,84,35,17,1,1
mptemp
mptemp,1,0,125,250,375,500,625                           ! 温度
mptemp,7,750,875,1000
mpdata,rsvx,2,1,.184e-6,.272e-6,.384e-6,.512e-6,.656e-6,.824e-6
mpdata,rsvx,2,7,1.032e-6,1.152e-6,1.2e-6                 ! 钢的电阻率
mptemp
mptemp,1,0,730,930,1000
mpdata,KXX,2,1,60.64,29.5,28,28
mptemp
mptemp,1,0,27,127,327,527,727
```

```
mptemp,7,765,765.001,927
mpdata,ENTH,2,1,0,91609056,453285756,1.2748e9,2.2519e9,3.3396e9
mpdata,ENTH,2,7,3.548547e9,3.548556e9,4.3520e9
mp,emis,2,.68                          ! 辐射
rectng,0,row,0,t                       ! 工件
rectng,row,ric,0,t                     ! 气隙
rectng,ric,roc,0,t                     ! 绕组
rectng,roc,ro,0,t
aglue,all
numcmp,area
ksel,s,loc,x,row                       ! 选择工件外圆上的关键点
kesize,all,skind/2                     ! 设置网格步长
ksel,s,loc,x,0                         ! 设置中心关键点
kesize,all,40*skind
lsel,s,loc,y,t/2                       ! 选择垂直线
lesize,all,,,1
lsel,all
asel,s,area,,1
aatt,2,1,1                             ! 设置工件区域的属性
asel,s,area,,3
aatt,3,1,2                             ! 设置绕组区域的属性
asel,s,area,,2,4,2
aatt,1,1,2                             ! 设置空隙区域的属性
asel,all
mshape,0,2d
mshk,1
amesh,1                                ! 划分工件区域
lsel,s,loc,y,0
lsel,a,loc,y,t
lsel,u,loc,x,row/2
lesize,all,.001
lsel,all
amesh,all
nsel,s,loc,x
d,all,az,0
nsel,all
esel,s,mat,,3
bfe,all,js,,,,15e6
alls
                                       ! 热模型
et,4,55,,,1                            ! PLANE55 热单元,对称
agen,2,1,,,,,,,1
aatt,2,1,4
```

```
ksel,s,loc,x,row                              ! 选择工件外圆的关键点
kesize,all,skind/2
ksel,s,loc,x,0
kesize,all,40 * skind
lsel,s,loc,y,t/2
lesize,all,,,1
lsel,all
mshape,0,2d
mshk,1
amesh,5
asel,,,,5
allsel,below,area
nsel,r,loc,x,row
sf,all,rdsf,0.68,1                            ! 辐射
alls
spctemp,1,25                                  ! 空隙温度
v2dopt,1
radopt,,0.01
stef,5.67e-8                                  ! 斯蒂芬—玻耳兹曼常数
esel,s,mat,,2                                 ! 选择工件材料
bfe,all,fvin,,1
finish
/solu
mfan,on
mfel,1,1,2
mfel,2,4
mfor,1,2
mfti,ftime
mfdt,tinc
mfco,all,1e-3
antyp,harm
harfrq,150000
outres,all,all
tunif,100
mfcm,1,
mfclear,solu
antype,trans                                  ! 热分析选项
toffst,273
tunif,100                                     ! 初始均匀温度
kbc,1                                         ! 载荷
trnopt,full
autos,on
deltim,.01,.005,.01,on
```

```
mfcm,2,
mfvo,1,1,hgen,2
mfvo,1,2,temp,1
solve
save
finish
/post26
file,field2,rth
esel,s,type,,4
nsle,s
nsel,r,loc,x,row
nsel,r,loc,y,0
*get,nor,node,,num,min
nsle,s
nsel,r,loc,x,0
nsel,r,loc,y,0
*get,nir,node,,num,min
nsol,2,nor,temp,,outerR                    ! 外圆半径
nsol,3,nir,temp,,innerR                    ! 内部半径
/axlab,y,temperature
plvar,2,3                                  ! 打印温度曲线
prvar,2,3
finish
/post1
file,field2,rth
set,last                                   ! 求解 3s 时
esel,s,type,,4                             ! 选择温度类型
plns,temp                                  ! 打印温度曲线(见图 4-5)
finish
```

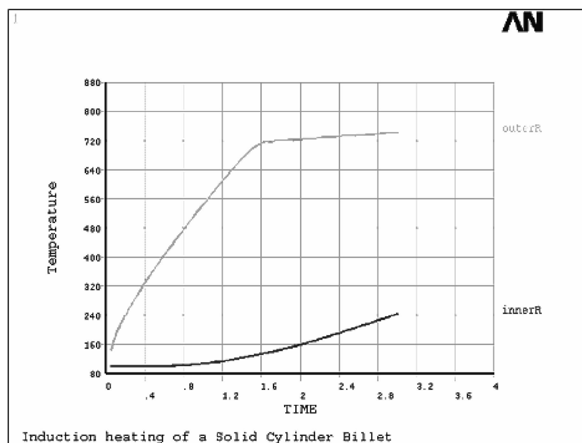


图 4-5　加热 3s 后表面和心部的温度曲线

4.2.3 实例 3—二维非线性谐波分析

一块厚度为 5mm 半无限钢板（见图 4-6）在一个绕组产生的磁场强度 H_m = 2644.1A/m 的条件下（50Hz），计算它的焦耳损耗（涡流损耗）。本算例采用的参数见表 4-5。

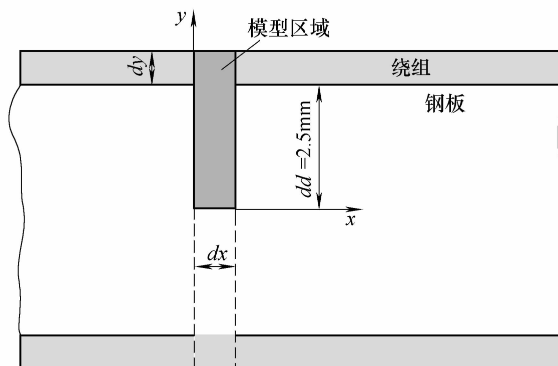


图 4-6　非线性谐波分析

表 4-5　材料特性

材 料 特 性	几 何 特 性	载　　荷
μ_r = 1.0（绕组）	dd = 0.0025m	H_m = 2644.1A/m
B—H 曲线（钢板）	$dx = dd/6$	$J = H_m/dy$
ρ = 1/5.0e6Ω·m（钢板）	$dy = dd/6$	ω = 50Hz

由于对称性，分析模型取板厚的一半。宽度 dx 任意，在 $Y=0$ 处，AZ 设置为 0。上部绕组节点对 AZ 耦合，电流密度为 $J=H_m/dy$，采用两步非线性求解法。

命令流如下：

```
/clear
/prep7
/filname,ex4 -3                    ! 定义工作文件名
dd =2.5e -3                        ! 板的 1/2 高度
Hm =2644.1                         ! 施加磁场
sigma =5.0e6                       ! 材料的导电性
ff =50                             ! 频率(Hz)
dx =dd/6                           ! 板宽度
dy =dd/6                           ! 绕组高度
et,1,plane53
mp,murx,1,1.                       ! 绕组的相对渗透率
tb,bh,2,,25                        ! B—H 曲线
tbpt,,100,.46512
tbpt,,200,.72993
tbpt,,300,.90090
tbpt,,400,1.0204
```

```
tbpt,,500,1.1086
tbpt,,600,1.1765
tbpt,,700,1.2302
tbpt,,800,1.2739
tbpt,,900,1.3100
tbpt,,1000,1.3405
tbpt,,1400,1.4257
tbpt,,1800,1.4778
tbpt,,2200,1.5131
tbpt,,2600,1.5385
tbpt,,3000,1.5576
tbpt,,3400,1.5726
tbpt,,3800,1.5847
tbpt,,4200,1.5945
tbpt,,4600,1.6028
tbpt,,5000,1.6098
tbpt,,7000,1.6332
tbpt,,9000,1.6465
tbpt,,11000,1.6551
tbpt,,13000,1.6611
tbpt,,15000,1.6656
mp,rsvx,2,1/sigma
rect,0,dx,0,dd! plate
rect,0,dx,dd,dd+dy                          ! 绕组
aglue,all
asel,s,loc,y,dd,dd+dy
aatt,1,0,1
asel,s,loc,y,0,dd
aatt,2,0,1
asel,all
amesh,all
nsel,s,loc,y,
d,all,az,0.
nsel,s,loc,y,dd+dy
cp,1,az,all
nsel,all
finish
/solu
antype,harmic
esel,s,mat,,1
bfe,all,js,,0.,0.,hm/dy,0.                  ! 施加绕组电流密度
esel,all
hmagsolv,ff,,1e-2                           ! 非线性求解
```

```
finish
/post1
set,last,1,,0
esel,s,mat,,2
PLF2D,27,0,10,1                         ! 显示磁力线(见图 4-7)
Powerh
pavg = pavg * 2/dx                      ! 单位转换为 W/m2
*vwrite,pavg
finish
```

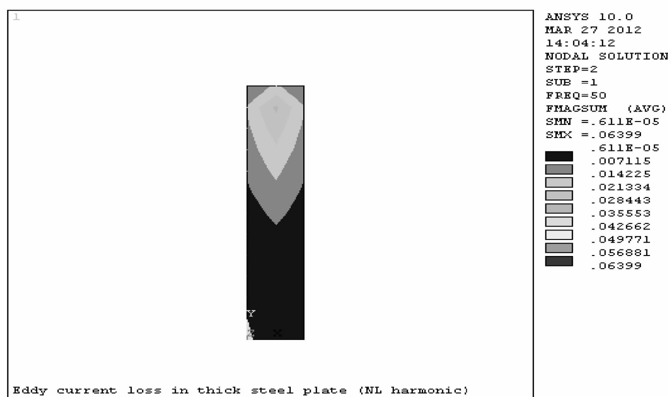


图 4-7 磁力线分布

4.2.4 实例 4—电磁驱动器的三维电磁场分析

电磁驱动器如图 4-8 所示。一个静态(直流)电流激发绕组和提供动力的移动电枢。电流为 6A，有 500 匝绕组。分析采用 1/4 对称模型的。本算例采用的参数见表 4-6。

表 4-6 参数

H/(A/m)	**B**/T	**H**/(A/m)	**B**/T
355	0.70	7650	1.75
405	0.80	10100	1.80
470	0.90	13000	1.85
555	1.00	15900	1.90
673	1.10	21100	1.95
836	1.20	26300	2.00
1065	1.30	32900	2.05
1220	1.35	42700	2.10
1420	1.40	61700	2.15
1720	1.45	84300	2.20
2130	1.50	110000	2.25
2670	1.55	135000	2.30
3480	1.60	200000	2.41
4500	1.65	400000	2.69
5950	1.70	800000	3.22

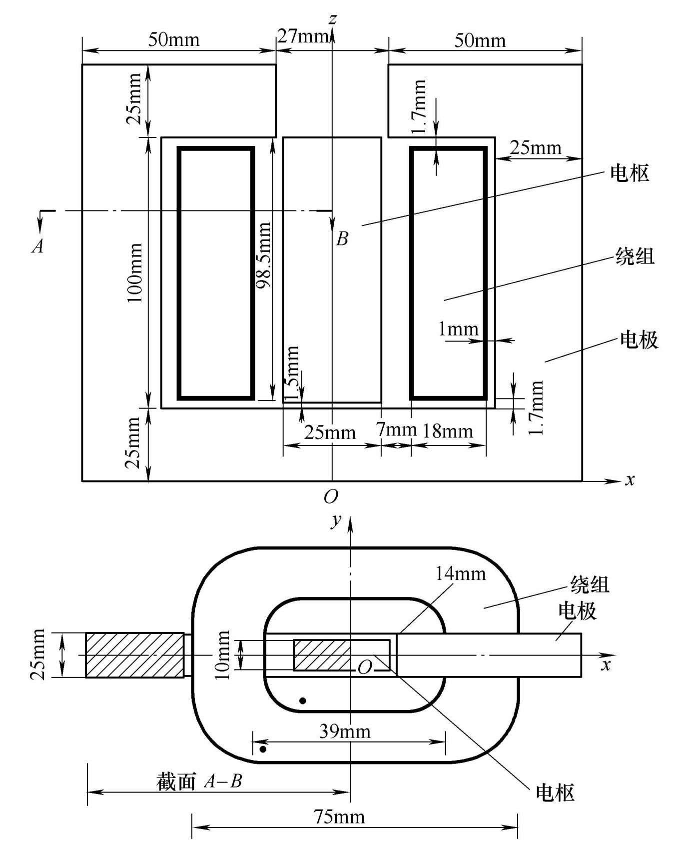


图 4-8　电磁驱动器示意图

命令流如下：

```
/clear
/batch list
/prep7
/title,3 - DStatic Force Problem-Tetrahedral
/com,
n = 500                                    ! 定义分析参数,绕组匝数
i = 6                                      ! 每匝电流强度
et,1,96                                    ! 定义单元类型
mp,murx,1,1                                ! 定义空气和钢的性能参数
tb,bh,2,,40
tbpt,,355,.7
,,405,.8
,,470,.9
,,555,1.0
,,673,1.1
,,836,1.2
,,1065,1.3
,,1220,1.35
```

```
,,1420,1.4
,,1720,1.45
,,2130,1.5
,,2670,1.55
,,3480,1.6
,,4500,1.65
,,5950,1.7
,,7650,1.75
,,10100,1.8
,,13000,1.85
,,15900,1.9
,,21100,1.95
,,26300,2.0
,,32900,2.05
,,42700,2.1
,,61700,2.15
,,84300,2.2
,,110000,2.25
,,135000,2.3
,,200000,2.41
,,400000,2.69
,,800000,3.22
tbcopy,bh,2,3
/pnum,volu
block,0,63.5,0,25/2,0,25
/view,1,1,1,1
/replot
block,38.5,63.5,0,25/2,25,125
block,13.5,63.5,0,25/2,125,150
vglue,all
block,0,12.5,0,5,26.5,125                    ! 电枢几何模型
block,0,13,0,5.5,26,125.5                    ! 空气几何模型
vovlap,1,2
numcmp,volu
cyl4,,,0,0,100,90,175
vovlap,all
numcmp,volu
! 设置体属性
vsel,s,volu,,1
vatt,3,1,1
vsel,s,volu,,3,5
vatt,2,1,1
! 划分单元
```

```
allsel,all
smrt,8                                                 ! 划分网格
mshape,1,3d
mshkey,0
vmesh,all
/pnum,mat,1
/number,1
eplot
esel,s,mat,,3
cm,arm,elem
fmagbc,'arm'
! 对体按一定比例进行缩放
allsel,all
vlscale,all,,,.001,.001,.001,,0,1
! 创建绕组
local,12,0,0,0,75/1000
wpcsys,-1
race,.0285,.0285,.014,n*i,.018,.0966,,,'coil1'
/eshape,1
eplot
save
finish
/solu                                                  ! 施加边界条件
d,2,mag,0
solve
allsel,all
magsolv,3,,,,,1
finish
/post1
plnsol,b,x,0                                           ! 画出磁通量密度的等值线(见图 4-9)
finish
```

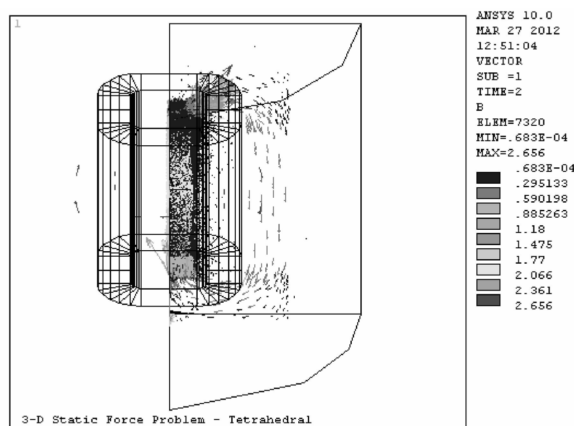


图 4-9　三维磁力线分布

4.3 本章总结

通过本章的学习，可以懂得关于电磁场的基本理论，还可以学会使用 ANSYS 软件对电磁场进行分析求解，并熟悉相应的操作步骤及相关命令。

4.4 练习题

1）麦克斯韦方程组的积分和微分形式是什么?

2）简单直流制动器，2 个实体圆柱铁心见图 4-10，中间被空气隙分开，绕组中心点处于空气隙中心，求电磁力和磁场值。

切去一部分绕组以便看到极面间空隙(单位:mm)，模拟由 3 个区域组成：衔铁区：导磁材料，磁导率为常数(即线性材料)；绕组区：绕组可视为均匀材料；空气区：自由空间($\mu_r=1$)。性质：柱体：$\mu_r=1000$；绕组：$\mu_r=1$；匝数：2000(整个绕组)；空气：$\mu_r=1$；激励：绕组励磁为直流电流(2A)。

3）高频电磁场分析，有一八面体谐振腔，长度为 1.6m，其横截面如图 4-11 所示，腔体壁材料为铜，腔体填充物为聚合物，求该谐振腔的谐振频率、品质因数和磁场分布。材料及几何参数见表 4-7。

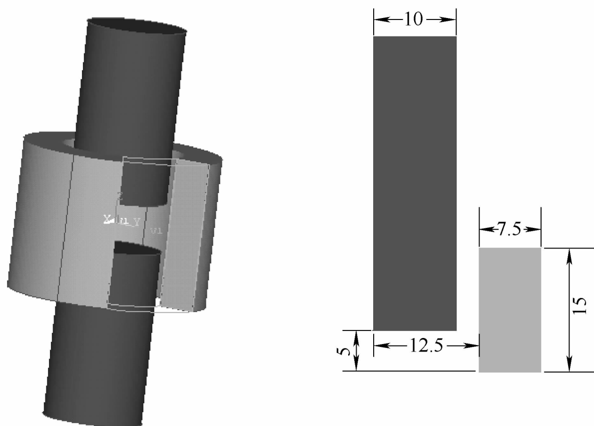


图 4-10 直流制动器

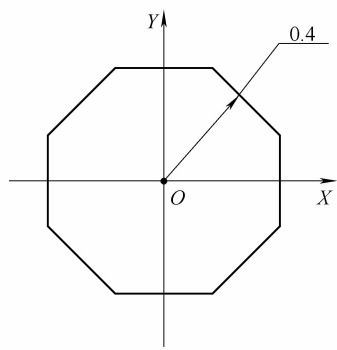


图 4-11 八面体横截面示意图

表 4-7 材料参数

相对磁导率 MURX1	电导率 PERX/(S/m)	相对磁导率 MURX2	介电常数 PERX	电导率/(S/m)
1	0.58e8	1	2	1e5

4）图 4-12 为 1/4 片的长直螺线管。实体模型包括一个铁核心、周围的空气和载流导线。

应用目前是平行的核心的半径。由此产生的磁场内的铁心几乎均匀地与 z 轴平行。相关参数见表 4-8。

表 4-8　相关参数

$r_1=1$	铁心半径	$\mu_{air}=1$	空气的渗透率
$r_2=2$	空隙区半径	H_t	目标磁场强度
$L=1$	直螺线管的厚度	B_t	磁通密度
$I=1$	电磁线圈中的电流载荷	W_t	电能
$\mu_{iron}=100$	铁的渗透率	L_t	电感

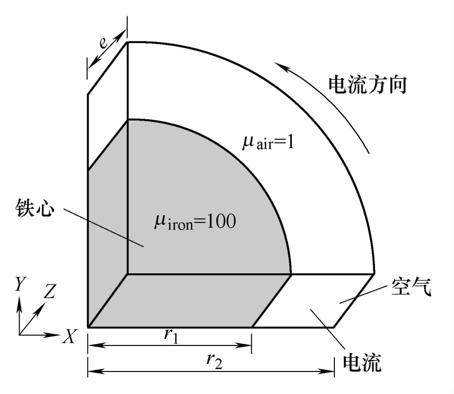


图 4-12　1/4 片的长直螺线管

第 5 章　基于 ANSYS 软件的耦合场数值模拟

5.1　耦合场分析的基本理论与操作

耦合场分析是指在有限元分析的过程中考虑了两种或者多种工程学科(物理场)的交叉作用和相互影响(耦合)。例如，压电分析考虑了结构和电场的相互作用，它主要解决由于所施加的位移载荷引起的电压分布问题，反之亦然。其他的耦合场分析还有热—应力耦合分析、热—电耦合分析、流体—结构耦合分析、磁—热耦合分析和磁—结构耦合分析等。

耦合场分析的过程取决于所需解决的问题是由哪些场的耦合作用的，但是，耦合场的分析最终可归结为两种不同的方法：序贯耦合方法和直接耦合方法。

1. 序贯耦合解法

序贯耦合解法是按照顺序进行两次或更多次的相关场分析。它是通过把第一次场分析的结果作为第二次场分析的载荷来实现两种场的耦合的。例如，序贯热—应力耦合分析是将热分析得到的节点温度作为“体力”载荷施加在后序的应力分析中来实现耦合的。

2. 直接耦合解法

直接耦合解法利用包含所有必须自由度的耦合单元类型，仅仅通过一次求解就能得出耦合场分析结果。在这种情形下，耦合是通过计算包含所有必须项的单元矩阵或单元载荷向量来实现的。例如，利用单元 SOLID5、PLANE13 或 SOLID98 可直接进行压电分析。

对于不存在高度非线性相互作用的情形，序贯耦合解法更为有效和方便，因为我们可以独立地进行两种场的分析。例如，对于序贯热—应力耦合分析，可以先进行非线性瞬态热分析，再进行线性静态应力分析。而后我们可以用热分析中任意载荷步或时间点的节点温度作为载荷进行应力分析。这里耦合是一个循环过程，其中迭代在两个物理场之间进行，直至结果收敛到所需要的精度。

直接耦合解法在解决耦合场相互作用且具有高度非线性时更具优势，并且可利用耦合公式一次性得到最好的计算结果。直接耦合解法的例子包括压电分析、伴随流体流动的热传导问题以及电路—电磁场耦合分析。求解这类耦合场相互作用的问题都有专门的单元供直接选用。

当需要迫使两个或多个自由度取得相同(但未知)值，可以将这些自由度耦合在一起。耦合自由度集包含一个主自由度和一个或多个其他自由度。

典型的耦合自由度应用包括：模型部分包含对称；在两重复节点间形成销钉、铰链、万向联轴器和滑动连接；迫使模型的一部分表现为刚体。

3. 生成耦合自由度集方法

在给定节点处生成并修改耦合自由度集，命令：CP；在生成一个耦合节点集之后，通过执行一个另外的耦合操作(保证用相同的参考编号集)将更多节点加入耦合集中。也可用

选择逻辑来耦合所选节点的相应自由度。用 CP 命令输入负的节点号来删除耦合集中的节点。要修改一耦合自由度集（即增、删节点或改变自由度标记）可用 CPNGEN 命令（不能由 GUI 直接得到 CPNBGEN 命令）。

耦合重合节点：CPINTF 命令通过在每对重合节点上定义自由度标记生成一耦合集而实现对模型中重合节点的耦合。此操作对“扣紧”几对节点（如一条缝处）尤为有用。

除耦合重复节点外，还可用下列替换方法迫使节点有相同的表现方式。

如果对重复节点所有自由度都要进行耦合，常用 NUMMRG 命令合并节点。可用 EINTF 命令通过重复节点对之间生成的 2 节点单元来连接它们。用 CEINTF 命令将两个有不相似网格模式的区域连接起来。这项操作使一个区域的选定节点与另一个区域的选定单元连接起来生成约束方程。一旦有了一个或多个耦合集，可用这些方法生成另外的耦合集。

用 CPLGEN 命令以相同的节点号但与已有模式集不同的自由度标记生成新的耦合集。

用 CPSGEN 命令生成与已有耦合集不同（均匀增加的）节点编号但有相同自由度标记的新的耦合集。

4. 热—结构耦合分析

温度的分布不均会导致部件内部产生热应力，在结构分析中常会遇到需要考虑温度场对应力分布影响的情况。特别在进行各类燃机的部件，如航空发动机的涡轮盘、叶片等的强度计算分析时通常要考虑热问题。各类输送管道由于内外温度不同也会产生热应力。另外材料的性能和其温度是相关的，不同的温度下其性能通常不同，这也会造成部件应力分布的变化。热—结构耦合问题是结构分析中通常遇到的一类耦合分析问题。由于结构温度场的分布不均会引起结构的热应力，或者结构部件在高温环境中工作，材料受到温度的影响会发生性能的改变，这些都是进行结构分析时需要考虑的因素。为此需要先进行相应的热分析，然后再进行结构分析。热分析用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，如热量的获取或损失、热梯度、热流密度（热通量）等。

热—结构耦合分析是指求解温度场对结构中应力、应变和位移等物理量影响的分析类型。对于热—结构耦合分析，在 ANSYS 中通常采用顺序耦合分析方法，即先进行热分析求得结构的温度场，然后再进行结构分析。且将前面得到的温度场作为体载荷加到结构中，求解结构的应力分布。

间接法顺序耦合分析主要分三步完成：①进行热分析，求得结构的温度场；②将模型中的单元转变为对应的结构分析单元，并将第一步求得的热分析结构当做体载荷施加到节点上；③定义其余结构分析需要的选项，并进行结构分析。

该问题用物理环境法处理基本步骤如下：①定义热分析问题；②写入热分析物理环境文件；③清除热分析边界条件及选项；④定义结构问题；⑤写入结构分析物理环境文件；⑥读入热分析物理环境文件；⑦热分析求解并进行后处理；⑧读入结构分析物理环境文件；⑨从热分析结果文件中读入温度；⑩求解并后处理物理文件。

热应力问题实际上是热和应力两个物理场之间的相互作用，故属于耦合场分析问题。与其他耦合场的分析方法类似，ANSYS 提供了两种分析热应力的方法：直接法和间接法。

直接法是指直接采用具有温度和位移自由度的耦合单元，同时得到热分析和结构应力分析结果；间接法则是先进行热分析，然后将求得的节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中。

ANSYS 运用直接法进行热应力分析主要采用耦合单元，其中包括热—应力耦合单元、热—应力—电和热—应力—磁耦合单元，表 5-1 显示了不同类型的热—应力耦合单元。

表 5-1 常用的热耦合单元

单元类型	单元名称
热—应力—电、热—应力—磁耦合单元	PLANE13、SOLID5、SOLID98、TARGE169、TARGE170、CONTA171、CONTA172、CONTA173、CONTA175、CONTA223、SOLID226、SOLID227

间接法一般是先采用常规热单元进行热分析，然后将热单元转换为响应的结构单元，并将求得的节点温度作为体载荷施加到模型上再进行结构应力分析，因此在整个分析过程中存在热单元与结构单元的转换问题，表 5-2 列出了热单元与响应的结构单元的对应关系。

表 5-2 热单元与结构单元的转换表

热单元	结构单元	热单元	结构单元
LINK32	LINK1	PLANE75	PLANE25
LINK33	LINK8	PLANE77	PLANE82
PLANE35	PLANE2	PLANE78	PLANE83
PLANE55	PLANE42	SOLID87	SOLID92
SHELL57	SHELL63	SOLID90	SOLID95
PLANE67	PLANE42	SHELL131	SHELL181
LINK68	LINK8	SHELL132	SHELL91/SHELL93
SOLID69	SOLID45	SURF151	SURF153
SOLID70	SOLID45	SURF152	SURF154
MASS71	MASS21	SHELL157	SHELL63

使用耦合的注意事项：每个耦合的节点都在节点坐标系下进行耦合操作；通常应当保持节点坐标系的一致性；自由度是在一个集内耦合而不是集之间的耦合；不允许一个自由度出现在多于一个耦合集中；由 D 或其他约束命令指定的自由度值不能包括在耦合集中；在减缩自由度分析中，如果主自由度要从耦合自由度集中选取，只有主节点的自由度才能被指定为主自由度；在结构分析中，耦合自由度生成的刚体区域有时会引起明显的平衡破坏；不重复的或不与耦合位移方向一致的一个耦合节点集会产生外加力矩但不出现在反力中。

5.2 ANSYS 软件在耦合场模拟中的应用实例

5.2.1 实例 1—双金属厚壁圆桶的热应力分析

内径为 20mm，外径 $b=60$mm 的厚壁圆桶，高度 $h=200$mm，内壁由金属材料一制成，厚度为 20mm，热导率为 5W/(m·K)，弹性模量为 $E=30\times10^6$Pa，热膨胀系数为 $2\times10^{-5}\text{K}^{-1}$，泊松比为 0.3。外壁由金属材料二制成，厚度为 10mm，热导率为 10W/(m·K)，弹性模量为

$E=10.6\times10^{6}$Pa，热膨胀系数为 $1.35\times10^{-5}K^{-1}$，泊松比为 0.4。筒内表面温度为 30℃，筒外表面温度为 20℃。试确定壁截面的应力分布。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex5-1                ! 定义分析文件名
! 第一步:进行温度场分析的前处理并写温度场物理分析文件
/prep7                        ! 进入前处理器
/units,SI                     ! 使用公制单位
et,1,plane77,,,1              ! 选择 PLANE77 热分析单元并设置为轴对称分析
mp,KXX,1,5                    ! 定义材料一热导率
mp,KXX,2,10                   ! 定义材料二热导率
rectng,20,40,0,100            ! 建立材料一几何模型
rectng,40,60,0,100            ! 建立材料二几何模型
aglue,all                     ! 粘接各矩形
numcmp,area                   ! 压缩面编号
asel,s,,,1
aatt,1,1,1                    ! 附于材料一材料属性
asel,s,,,2
aatt,2,1,1                    ! 附于材料二材料属性
asel,all
esize,0.5                     ! 定义单元划分尺寸
mshkey,2                      ! 设置为映射单元划分类型
amesh,all                     ! 划分单元
nsel,s,loc,x,20
d,all,temp,30                 ! 施加材料一内壁温度边界条件
nsel,s,loc,x,60
d,all,temp,20                 ! 施加材料一内壁温度边界条件
nsel,all
physics,write,thermal         ! 写温度场物理分析文件
! 第二步:进行结构场分析的前处理并写结构场物理分析文件
physics,clear                 ! 清空物理环境数据
ddel,all                      ! 删除温度场温度载荷
et,1,82,,,1                   ! 选择结构分析单元
mp,ex,1,30e6                  ! 定义材料一结构场材料属性
mp,alpx,1,2e-5
mp,nuxy,1,0.3
mp,ex,2,10.6e6                ! 定义材料二结构场材料属性
mp,alpx,2,1.35e-5
mp,nuxy,2,0.4
nsel,s,loc,y,.05              ! 选择两厚壁筒顶面节点
cp,1,uy,all                   ! 耦合节点 Y 向自由度
nsel,s,loc,x,20               ! 选择材料一内壁节点
```

```
cp,2,ux,all                      ! 耦合节点 X 向自由度
nsel,s,loc,y,0                   ! 选择两厚壁筒底面节点
d,all,uy,0                       ! 施加 Y 向位移约束
nsel,all
tref,25                          ! 定义参考温度
physics,write,struct             ! 写结构场物理分析文件
save                             ! 存盘
finish
! 第三步:读取温度场物理分析文件进行求解和后处理
/solu
physics,read,thermal             ! 读取温度场物理分析文件
solve                            ! 求解
finish
/post1                           ! 进入通用后处理器
path,radial,2                    ! 定义径向显示路径
ppath,1,,20
ppath,2,,60
pdef,temp,temp                   ! 向所定义路径映射温度分析结果
pasave,radial,filea              ! 保存路径文件
plpath,temp                      ! 显示沿路径温度变化曲线图(见图 5-1)
finish
! 第四步:读取结构场物理分析文件并读取温度场计算结果进行结构场求解和后处理
/solu
physics,read,struct              ! 读取结构场物理分析文件
ldread,temp,,,,,,rth             ! 读取温度场分析结果
solve                            ! 求解
finish
/post1                           ! 进入通用后处理器
paresu,raidal,filea              ! 读取已存路径文件
pmap,,mat                        ! 定义沿路径不连续区域处理方法
pdef,sx,s,x                      ! 向所定义路径映射 X 向应力分析结果
pdef,sz,s,z                      ! 向所定义路径映射 Z 向应力分析结果
plpath,sx,sz                     ! 显示沿路径 X 和 Z 向应力分析曲线
plpagm,sx,,node                  ! 在几何模型上显示 X 向应力分布云图
plnsol,s,eqv,0,1                 ! 显示等效应力分析结果(见图 5-2)
finish
/exit,nosav                      ! 退出 ANSYS
```

掌握定义热膨胀系数的操作，可以定义热—应力耦合分析问题的材料热膨胀系数；掌握耦合场单元转换操作，并可以根据分析类型自主调整单元参数，本例中需要调整的主要是结构分析单元的材料属性(热分析过程中没有定义)。掌握简单的热—应力耦合分析验证方法，对简单的模型可以通过常识或者自己计算大致的结果判断 ANSYS 分析结果是否可以接受；可以利用直接法进行简单的热—应力耦合分析。

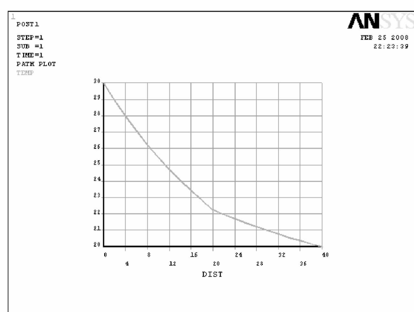


图 5-1　沿路径温度变化曲线图

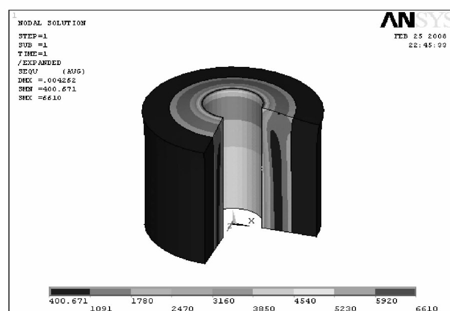


图 5-2　等效应力分析结果

5.2.2　实例 2—热电耦合分析

边长为 0.01m 的正方形半导体元件和一个连接铜带组成见图 5-3，温度载荷 $T=50℃$，冷却温度 0℃，电流为 20A，求冷却器中的温度场和电场分布。

N 型半导体元件的材料参数：

电阻率 $\rho_n = 1.05\times10^{-3}\Omega\cdot cm$　热导率 $\lambda_n = 0.013W/(cm\cdot K)$

热电系数 $\alpha_n = -165\mu V/K$

P 型半导体元件的材料参数：

电阻率 $\rho_p = 0.98\times10^{-3}\Omega\cdot cm$　热导率 $\lambda_p = 0.012W/(cm\cdot K)$

热电系数 $\alpha_p = 210\mu V/K$

铜带材料参数：

电阻率 $\rho = 1.7\times10^{-6}\Omega\cdot cm$　热导率 $\lambda = 400W/(cm\cdot K)$

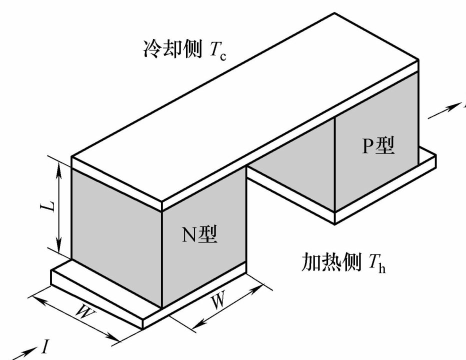


图 5-3　热电冷却器

该问题属于热电耦合分析问题，选取整个热电冷却器建立几何模型。

命令流如下：

```
/clear
/title,Thermoelectric Cooler
/filname,ex5-2                        ! 定义分析文件名
/vup,1,z
/view,1,1,1,1
/triad,off
/number,1
/pnum,mat,1
/nopr
/prep7
! 热电冷却器尺寸
l=1e-2                                ! 单元长度, m
w=1e-2                                ! 单元宽度, m
```

```
hs = 0.1e-2
toffst,273                              ! 温度补偿, ℃
! N 型半导体元件的材料参数
mp,rsvx,1,1.05e-5                       ! 电阻率,Ω·m
mp,KXX,1,1.3                            ! 热导率 W/(m·K)
mp,sbkx,1,-165e-6                       ! V/K
! P 型半导体元件的材料参数
mp,rsvx,2,0.98e-5                       ! 电阻率,Ω·m
mp,KXX,2,1.2                            ! 热导率,W/(m·K)
mp,sbkx,2,210e-6
! 定义铜带材料
mp,rsvx,3,1.7e-8                        ! 电阻率,Ω·m
mp,KXX,3,400                            ! 热导率,W/(m·K)
! 定义有限元单元
et,1,226,110
et,2,227,110
block,w/2,3*w/2,,w,,1
block,-3*w/2,-w/2,,w,,1
block,-3*w/2,3*w/2,,w,1,1+hs
block,-1.7*w,-w/2,,w,-hs,0
block,w/2,1.7*w,,w,-hs,0
vglue,all
esize,w/3
type,1
mat,1
vmesh,1
mat,2
vmesh,2
type,2
mat,3
lesize,61,hs
lesize,69,hs
lesize,30,w/4
lesize,51,w/4
lesize,29,w/4
lesize,50,w/4
vmesh,6,8
eplot
! 边界条件和载荷
nsel,s,loc,z,1+hs                       ! 冷接头
cp,1,temp,all
nc = ndnext(0)
nsel,s,loc,z,-hs                        ! 热接头
```

```
d,all,temp,54
nsel,s,loc,x,-1.7*w
d,all,volt,0
nsel,s,loc,x,1.7*w
cp,2,volt,all
ni=ndnext(0)                          ! 得到主要接点
nsel,all
finish
/solu                                 ! 第一次求解
antype,static
d,nc,temp,0
I=28.7
f,ni,amps,I
solve
finish
/com
/com
/com Heat absorbed at the cold junction Qc=%Qc%,watts
/com
P=volt(ni)*I
/com Power input P=%P%,watts
/com
/com Coefficient of performance beta=%Qc/P%
/com
/solu                                 ! 第 2 次求解
ddele,nc,temp                         ! 删除冷接点的温度约束
f,nc,heat,Qc                          ! A 在冷接点施加热流率
solve
finish
/com
/com Temperature at the cold junction Tc=%temp(nc)%, deg. C
/com
/show,win32c
/cont,1,18                            ! 设置曲线的数量
/post1
plnsol,temp                           ! 打印温度曲线
finish
```

模拟结果—温度场等值线图见图 5-4。

5.2.3　实例 3—流体—结构耦合分析的实例

对瞬态流体—结构分析，相应于流体边界条件逐渐改变的间隔点需要进行结构分析。例如假定要从 2s 执行结构分析，进口速度从 0s 时的 1.0in/s 渐变到 4s 时的 5.0in/s。首先在

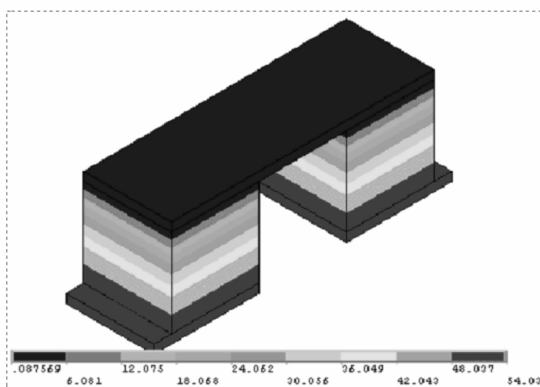


图 5-4　模拟结果—温度场等值线图

2s 以通常的方式执行结构分析。当执行 PHYSICS，READ，FLUID 时(Main Menu > Solution > Physics Environ > Read)恢复流体分析，可以重新施加瞬态渐变载荷。在第 2s 施加进口速度为 3.0in/s 然后通过执行下列命令表明这是老边界条件：FLOCHECK，2。GUI：Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Flocheck 意味着第 2s 的进口边界条件 3.0in/s 是渐变的起点。然后输入最终的渐变载荷点——第 4s 的速度 5.0in/s。利用下面方法指定渐变边界条件：Command(s)：F。

DATA4，TIME，BC，1；GUI：Main Menu > Preprocessor > FLOTRAN Set Up > Execution Ctrl。利用通常的 SOLVE 命令执行瞬态分析。

流道中有一橡胶垫阻碍水的流动，入口流速为 0.35m/s(见图 5-5)，其他参数将在命令流中详细给出。求解水通过此流道的压降，以及稳态条件下橡胶垫的变形。建立所要分析的流体及固体区域的模型。对于此问题应当创建三个区域：①橡胶垫；②环绕橡胶垫的流体区域，要求网格随移；③纯流体区域。

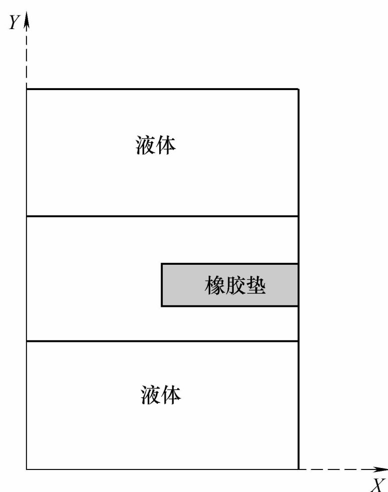


图 5-5　分析区域划分

橡胶垫将在流体压力作用下发生变形。变形的大小将显著影响流场的形状。在本例中定义的一个环绕橡胶垫的流体区，用于流体物理环境。通过结构区域的结构分析获得的橡胶垫位移用于随移环绕橡胶垫的小区域。随后的流体分析使用随移后的网格。流体分析对橡胶垫使用零单元结构分析，对流体使用零单元。创建整个几何模型，包括流体、橡胶垫区域。用 AATT 命令赋予这些面的单元类型编号、材料编号以及实常数编号。表 5-3 列出编号分配。可能是流体区域的所有材料编号都设定为 1。虽然实常数在本例中给出但并不使用。

表 5-3　物理环境属性

区　　域	单 元 类 型	材　　料	实　常　数
橡胶垫	3	2	2
流体	1	1	1

命令流如下：

```
/clear
/prep7
/sho,gasket,grph
/filname,ex5-3                         ! 定义分析文件名
shpp,off
et,1,141
et,2,182,
*set,yent , 0.0
*set,dyen,1.0
*set,ysf1,yent+dyen
*set,dsf1,0.5
*set,ygas,ysf1+dsf1
*set,dg,0.02
*set,dg2,dg/2.
*set,ytg,ygas+dg
*set,dsf2,0.5
*set,ysf2,ytg+dsf2
*set,dyex,    6.0
*set,x,0.
*set,dgasr,.20
*set,piper,0.3
*set,xrgap,piper-dgasr
rect,xrgap,piper,ygas,ytg
rect,x,piper,ysf1,ysf2
rect,x,piper,yent,ysf1
rect,x,piper,ysf2,ysf2+dyex
aovlap,all
k,22,xrgap+dg2,ygas+dg2                ! 定义一个关键点为 22 号,坐标是(x,y)
*set,rarc,dg2*1.1
larc,1,4,22,rarc                       ! 定义一个通过(1,4)点半径为 dg2*1.1,圆心在 22 点这边的圆弧
al,6,4                                 ! 定义一个由相关线围成的面
adelete,7                              ! 删除面 7
al,6,3,22,7,8,5,21,1                   ! 定义一个由相关线围成的面
!! 划分网格信息
*set,ngap,10
*set,ngas,10
*set,rgas, -2
*set,nflu,ngap+ngas
*set,raflu, -3
*set,nenty,8
*set,raent,5
*set,nfl1,20
```

```
*set,nthgas,4
*set,nfl2,3
*set,next,30
*set,rext,6
*set,rafls,12
lesize,1,,,ngas,rgas                              ! 指定所选线上单元数,线 1 上划分 10 个单元,中间尺寸比两端尺寸 = | -2 |
lesize,3,,,ngas,rgas                              ! 指定所选线上单元数,线 3 上划分 10 个单元,中间尺寸比两端尺寸 = | -2 |
*set,nfl11,nfl1*2+9
lsel,s,,,2,4,2                                    ! 选择线从 2 号线递增到 4 号线,每次递增 2
lesize,all,,,nthgas
alls
lesize,5,,,nflu,raflu
lesize,7,,,nflu,raflu
lesize,9,,,nflu,raflu
lesize,15,,,nflu,raflu
lesize,18,,,nenty,1./raent
lesize,17,,,nenty,1./raent
lesize,21,,,nfl1,rafls
lesize,8,,,nfl11,-1./(rafls+3)
lesize,22,,,nfl1,rafls
lesize,19,,,next,rext
lesize,20,,,next,rext
asel,s,,,1,2                                      ! 选择面从 1 号面递增到 2 号面,每次递增 1(默认)
aatt,2,2,2                                        ! (material 2)赋给选择的区域 2 号材料属性,2 号实常数,2 号单元类型
asel,s,,,3                                        ! 选择面 3
cm,area2,area                                     ! 把选择的面名称定义为 area2
alist
asel,a,,,5,6                                      ! 在原来的基础上添选面 2,3
aatt,1,1,1
alls
/eshape,2
asel,u,,,2,3                                      ! 在当前已经选择的面中选面 2、3
amesh,all                                         ! 划分已选择的面
/eshape,0
asel,s,,,2,3
amesh,all
asel,s,,,1,3                                      ! 选择面 1、3
esla,s                                            ! 选择被选面上的单元点
/Title, Initial mesh for gasket and neighborhood  ! 命名标题
eplot
```

```
/ZOOM,1,RECT,0.3,-0.6,0.4,-0.5      ! 选择区域
alls
! 第二大步创建流体的物理环境
et,1,141                            ! 定义 1 号单元为 141 号材料单元
et,2,0                              ! 定义 2 号单元为 0 号单元
*SET,vin,3.5e-1
flda,solu,flow,1                    ! 计算流体力学求解控制
flda,solu,turb,1
flda,iter,exec,400
flda,outp,sumf,10
flda,prot,dens,constant             ! 计算流体力学属性控制
flda,prot,visc,constant             ! 黏度
flda,nomi,dens,1000.                ! 密度
flda,nomi,visc,4.6e-4               ! 黏性
flda,conv,pres,1.e-8                ! 收敛判断
lsel,s,,,8,17,9                     ! 计算流体力学中固体模型的边界条件,选择线 8、17、9
lsel,a,,,20                         ! 添选线 20
dl,all,,vx,0.,1                     ! 定义所选直线中的所有的直线约束,vx 为 0,直线的端点同样被作用
lsel,s,,,9
dl,all,,vx,0.,1
dl,all,,vy,vin,1                    ! 入口条件
lsel,s,,,2
lsel,a,,,18,19
lsel,a,,,21,22
dl,all,,vx,0.,1                     ! 外围边界条件 vx,vy 为 0
dl,all,,vy,0.,1
lsel,s,,,1,3,2
lsel,a,,,6
dl,all,,vx,0.,1                     ! 橡胶垫的 vx、vy 为 0
dl,all,,vy,0.,1
lsel,s,,,15
dl,15,,pres,0.,1                    ! 出口压力条件,压力为 0
lsel,s,,,1                          ! 选择线 1
nsll,,1                             ! 选择所选择线上的节点,包括关键点
cm,gasket,node                      ! 定义所选择的点
alls                                ! 选择所有
/title,Fluid Analysis
physics,write,fluid,fluid
physics,clear
et,1,0
et,2,182
keyopt,2,3,2                        ! 单元 2 的第 3 个选项为 2
```

```
keyopt,2,6,1
keyopt,2,1,2
mp,nuxy,2,0.49967                      ! 定义 2 号单元的泊松比
tb,mooney,2                            ! 数据表
tbdata,1,0.293e+6                      ! 在数据表中的第一个表
tbdata,2,0.177e+6
tb,hyper,2,,2,mooney
tbdata,1,0.293e+6,0.177e+6,(1.0-2.0*0.49967)/(0.293e+6+0.177e+6)
lsel,s,,,2                             ! 选择线 2
nsll,,1                                ! 选择所选择线上的点,包括端点
d,all,ux,0.                            ! 定义所有选择的点的 x 位移为 0
d,all,uy,0.
alls
/title,structural analysis
finish
/solu                                  ! 进入求解器
antype,static                          ! 定义分析类型为静态求解
nlgeom,on                              ! 在静态分析或完全瞬态分析中包含大变形效应
cnvtol,f,,,,-1                         ! 设置非线性分析的收敛值
physics,write,struc,struc
physics,clear                          ! 从数据库清除所有的信息,但是不清除当前的 physics 文件
save                                   ! 保存
loop=25                                ! 定义最大循环次数为 25
toler=0.005                            ! 定义最大位移的收敛误差
*dim,dismax,array,loop                 ! 定义大小为 25 的名为 dismax 的矩阵
*dim,strcri,array,loop                 ! 定义大小为 25 的名为 strcri 的矩阵
*dim,index,array,loop                  ! 定义大小为 25 的名为 index 的矩阵
/solu                                  ! 进入求解器
physics,read,fluid                     ! 读取流体环境设置
*if,i,ne,1,then
flda,iter,exec,100                     ! 设置 PLOTRAN 分析中用到的参数
physics,read,struc                     ! 读取结构环境设置
/assign,esave,struc,esav               ! 为下一步的结构分析分配文件
/assign,emat,struc,emat
*if,i,gt,1,then                        ! 如果 i>1,执行……
parsave,all                            ! 保存所有的参数
resume                                 ! 恢复数据,返回初始节点位置
parresume                              ! 恢复所有的参数数据
/prep7
antype,stat,rest                       ! 重启分析
finish
*endif
/solu
```

```
solc,off
lsel,s,,,1,3,2                          ! 选择合适的线施加流体压力
lsel,a,,,6                              ! 添选线 6
nsll,,1                                 ! 选择线上的点,包括端点
esel,s,type,,2                          ! 选择一簇单元,按照单元类型号,跨幅最大为 2
ldread,pres,last,,,,,rfl                ! 读取流体面的压力结果文件,作为结构分析的荷载条件
sfelist                                 ! 列表显示单元的面荷载
alls
rescontrol,,none
solve
/post1
cmsel,s,gasket                          ! 选择 gasket(gasket 见 line160)
nsort,u,sum,1,1                         ! 设置列表顺序显示总位移按绝对值递增顺序
*get,dismax(i),sort,0,max               ! 得到最大的位移值
strcri(i) = toler*dismax(i)             ! 初始化 strcri 矩阵第 i 个元素
alls
finish
/prep7
mkey = 2
damorph,area2, ,mkey                    ! 移动 area2 的节点,使其服从变形
finish
/prep7
et,1,42
asel,s,,,1,3
esla,s                                  ! 选择被选择面上的节点
/Title, EPLOT after DAMORPH,area2, ,%mkey% step number %i%
eplot
alls
cmsel,s,gasket                          ! 选择 gasket
nlist                                   ! 显示节点
alls
finish
/assign,esav                            ! 为下一步的结构分析分配文件
/assign,emat
imax = i
index(i) = i
*if,i,gt,1,then
  strcri(i) = abs(dismax(i) - dismax(i-1)) - toler*dismax(i-1)
  *if,strcri(i),le,0,then
    strcri(i) = 0
    *exit
  *endif
*endif
```

```
*enddo
save
  *vwrite
 (/'Loop No.    Max. Displacement   Struct. Convergence')
/nopr
  *vlen,imax
  *vwrite,index(1),dismax(1),strcri(1)
 (f7.0,2e17.4)
finish
```

图 5-6、图 5-7 和图 5-8 分别为橡胶垫附近的流线、压力分布以及橡胶垫的变形。

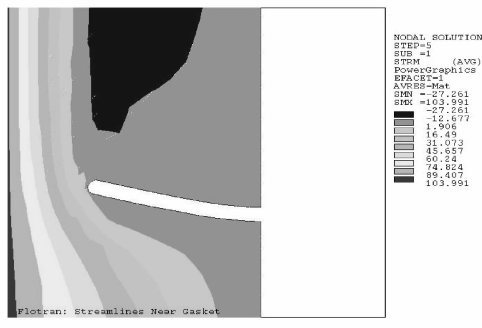


图 5-6 橡胶垫附近的流线

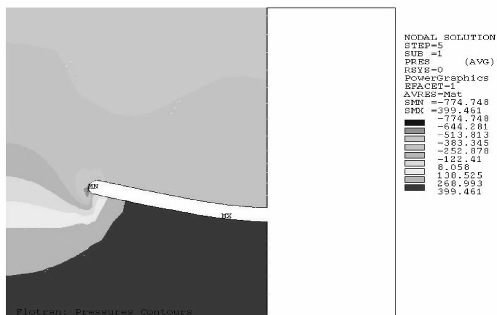


图 5-7 橡胶垫附近的压力分布

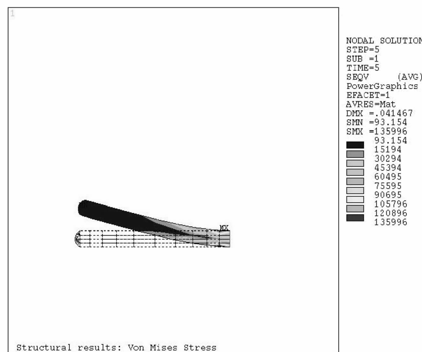


图 5-8 橡胶垫的变形

5.2.4 实例 4—用物理环境法进行液压缸中流体结构耦合分析

液压缸的宽度为 0.25m，高度为 0.995m，下面有 1 个高为 0.005m 的活塞，流体的密度为 1000kg/m^3，黏度为 0.001Pa·s，活塞的弹性模量为 2.0e11Pa，密度为 7800kg/m^3，泊松比为 0.3，活塞速度为 3m/s。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex5-3
/config,nres,2000
/prep7                    ! 创建包括结构和流体区域的完整有限元模型
```

```
shpp,off
et,1,fluid141,,,1
et,2,plane42,,,1
rect,0,0.25,0,0.005
rect,0,0.25,0.005,0.3
rectng,0,0.25,0.3,1
aglue,all
lesize,13,0.03,,,.4          ! 设定线上单元尺寸控制
lesize,14,0.03,,,.4
esize,0.01                   ! 设定总体单元尺寸控制
mshape,0                     ! 选择单元形状为四边形
mshkey,1                     ! 映射网格
aatt,2,2,2                   ! 指定单元属性
amesh,1                      ! 对活塞矩形面划分网格
aatt,1,1,1
amesh,4,5                    ! 对流体矩形面划分网格
alls                         ! 选择所有
finish                       ! 退出前处理器
/prep7
et,1,141,,,1
et,2,0
fldata1,solu,flow,1
flda,solu,turb,1
fldata4,time,glob,20
flda,prot,dens,constant
flda,prot,visc,constant
flda,nomi,dens,1000
flda,nomi,visc,0.001
nsel,s,loc,y,1
nsel,r,loc,x,0.05,0.25
lsel,s,,,13,15,2
nsll,A,1
d,all,vx,0
d,all,vy,0
nsel,s,loc,y,1
nsel,r,loc,x,0.05,0
d,all,pres,0
alls
lsel,s,,,14,16,2
nsll,s,1
d,all,vx
alls
finish
```

```
save                                    ! 保存数据库文件
physics,write,fluid,fluid
physics,clear
finish
/prep7
et,1,0
et,2,plane42,,,1
mp,ex,2,2.0e11                          ! 定义结构分析的材料模型;弹性模量
mp,DENS,2,7800
mp,prxy,2,0.3                           ! 泊松比
asel,s,,,1                              ! 选择结构上所有节点
nsla,s,1
d,all,ux                                ! 约束 x 方向自由度
alls
finish
/solu
antype,trans                            ! 瞬态分析
kbc,0                                   ! 斜坡载荷
lnsrch,on
outres,all,all                          ! 输出控制
nsubst,10,20,5
finish
save
physics,write,struc,struc
physics,clear
! 定义参数、数组
lsel,s,,,3                              ! 选择结构、流体分界线上节点
nsll,s,1
*get,node_count,node,0,count
*get,node_max,node,0,num,max
*get,node_min,node,0,num,min
*dim,vxx,array,node_count
*dim,vyy,array,node_count
*dim,node_num,array,node_count
alls
dismin0=0                               ! 分界线节点位移最小值变量赋初值
dismin1=0                               ! 分界线节点位移最小值变量赋初值
time=0.0002                             ! 分析时间
v=3                                     ! 活塞速度
*do,k,1,50
physics,read,struc
/solu                                   ! 进入求解器
*if,k,gt,1,then
```

```
lsel,s,,,3nsll,s,1
esel,s,type,,2                  ! 选择结构单元
ldread,pres,last,,,,,rfl
alls
*endif
lsel,s,,,2                      ! 选择活塞上 2 号线所有节点
nsll,s,1
d,all,uy,v*time                 ! 施加位移载荷
allsel
time,time                       ! 指定分析时间
solve                           ! 解答
finish
! 迭代收敛检查
/post1
set,last                        ! 读最后载荷子步结果到数据库
lsel,s,,,3                      ! 选择结构、流体分界线上节点
nsll,s,1
iii=1
nsort,u,y,0,1                   ! 对节点位移排序
*get,dismin1,sort,0,min
*if,abs((dismin1-dismin0)/dismin1),lt,1e-6,then
*exit                           ! 小于公差 1e-6,退出循环
*else
dismin0=dismin1                 ! 大于公差继续循环
*endif
*do,j,node_min,node_max
*if,nsel(j),eq,1,then
vyy(iii)=v
vxx(iii)=ux(iii)/uy(iii)*v
node_num(iii)=j
iii=iii+1
*endif
*enddo
alls
finish
! 网格随移
/prep7
damorph,4,,2                    ! 对面上网格随移
finish
physics,read,fluid              ! 进行流体分析
/solu
*do,j,1,node_count
d,node_num(j),vx,vxx(j)
```

```
d,node_num(j),vy,vyy(j)
 * enddo
solve
finish
 * enddo
physics,read,fluid
/post1
set,last
plnsol,pres
plvect,v,,,,vect,elem,on,0          ! 流场分布(见图 5-9)
finish
physics,read,struc
/post1
set,last
plnsol,s,eqv,1,1
finish
```

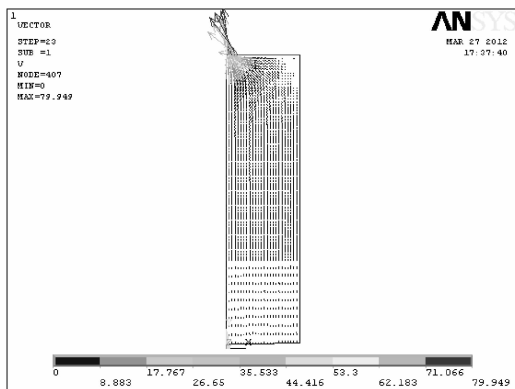


图 5-9　流场分布

5.2.5　实例 5—静电—结构分析的示例

用 ESSOLV 宏进行静电—结构分析。本例中，梁按图 5-10 所示放在栅极的上方。梁上施加一个电压栅极接地。该问题的目的是计算作用到梁上的合力及梁尖端的挠度。

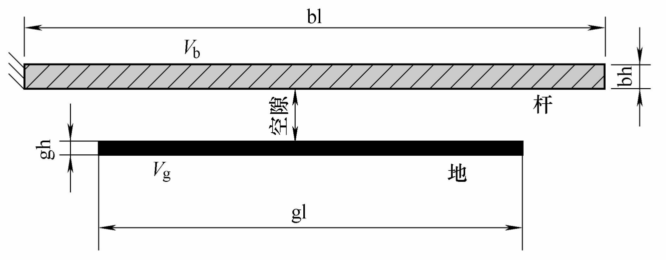


图 5-10　接地栅极上的梁

命令流如下：

```
/clear
/batch,list
/filname,ex5 -4
/prep7,Silicon beam deflection from an applied voltage
et,1,121                                    ! 空气区采用 PLANE121 单元
et,2,121                                    ! 梁的单元
emunit,epzro,8.854e -6                      ! 单位
mp,perx,2,1
bl =150                                     ! 长度(μm)
bh =2.0                                     ! 高度
glc =bl/2                                   ! 中心
gl =90                                      ! 导体长度
gh =1.5                                     ! 厚度
gap =4.5                                    ! 空气间隙
vltg =120                                   ! 施加电压
rectng, 0, bl, gap, bh + gap                ! 生成模型
rectng, glc -gl/2, glc +gl/2, -gh, 0
rectng, -10, 170, -20, 30
aovlap, all
asel, s, area,, 1                           ! 梁的区域
aatt, 1,, 1
asel, s, area,, 4                           ! 空气单元的区域
cm, air, area
aatt, 2,, 2
allsel, all
smrtsiz, 2
amesh, 1                                    ! 梁的划分网格
mshape, 1
amesh, 4
asel, s, area,, 1
lsla, s
dl, all,, volt, vltg
asel, s, area,, 2
lsla, s
dl, all,, volt, 0
allsel, all
et, 1, 0
physics, write, electros
physics, clear
et, 1, 82,,, 2
et, 2, 0
  mp, ex, 1, 170e3                          ! 模量  μN/μm^2
```

```
mp, nuxy, 1, 0.34
dl, 4,, ux, 0
dl, 4,, uy, 0
allsel, all
finish
physics, write, structure
  essolv, 'electros', 'structure', 2, 0, 'air',,,, 10     ! 耦合求解
problem
finish
physics, read, electros
/post1
set, last
plnsol, volt,, 0                                          ! 电磁场分布（见图 5-11）
esel, s, mat,, 2
etable, fx, fmag, x
etable, fy, fmag, y
ssum
finish
```

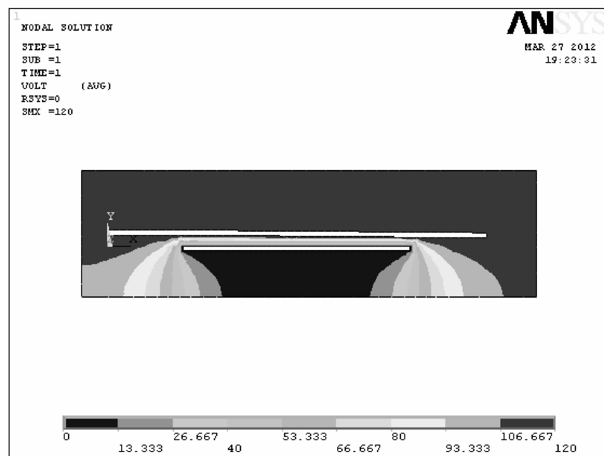


图 5-11 电磁场分布

5.2.6 实例 6—电子封装中的热—流体耦合模拟

随着 MCM 的发展，高功率密度的组件不断涌现，如何有效地降低 MCM 的温升，是普遍关心的问题。针对这个问题，国内外出现了多种多样的散热设计，提出了各自不同的散热方法，如空气射流冷却、液体喷射冷却、直接液体冷却(浸没冷却)、间接液体冷却(水冲板冷却)等。为了分析这些高级冷却方式的冷却能力，需采用流体动力学的原理进行模拟仿真。ANSYS 的计算流体动力学模块 FLOTRAN 是一个用于分析二维及三维流体运动场的先进工具，可执行：层流或湍流；传热或绝热；可压缩或不可压缩、牛顿流或非牛顿流；多组分输运等分析，可用于上述 MCM 冷却方式的模拟。以多芯片组件的液体间接冷却方式为例，

介绍 ANSYS 的计算流体动力学模块在电子封装热—流体耦合场模拟中的应用。MCM 封装体的结构与图 5-12 相同，只是将冷却方式由热沉换成水冷板，如图 5-12 所示。水冷板的材质为铝，厚度为 1mm，底面尺寸为 60mm × 60mm，冷却介质为水，水冷板内空间的高度为 60mm，进出口内径均为 4mm，进出口高度均为 10mm。

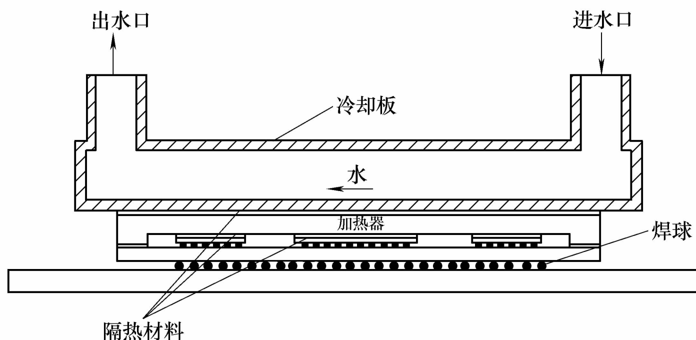


图 5-12　MCM 液体间接冷却示意图

热边界条件如下：热源为芯片的功耗，其中中间大芯片的功耗为 15W，热流密度为 $360.6\times10^6 W/m^3$；周围四个小芯片的功耗为 6w，热流密度为 $369.2\times10^6 W/m^3$。

命令流如下：

```
/clear
keyw,pr_cfd,1                                        ! 设置编号选项
/units,si                                            ! 国际单位制
/filname,ex5-5                                       ! 指定文件名
/title,2-d thermal and cfd simulation of multichip module ! 指定标题
                                                     ! 定义中间大芯片尺寸
*set,d1_length,8e-3
*set,d1_height,0.65e-3
                                                     ! 定义周围小芯片尺寸
*set,d2_length,5e-3
*set,d2_height,0.65e-3
                                                     ! 定义大芯片下凸点的尺寸和数量
*set,bs1_radius,0.15e-3
*set,bs1_dist,0.75e-3
*set,bs1_nb,10
*set,bs1_height,0.2e-3
*set,bs1_side,0.625e-3
                                                     ! 定义基板的尺寸
*set,bs2_radius,bs1_radius
*set,bs2_dist,0.75e-3
                                                     ! 定义基板下焊料球的尺寸和数量
*set,bs2_nb,6
*set,bs2_height,0.2e-3
*set,bs2_side,0.625e-3
```

```
*set,sub_length,40e-3
*set,sub_height,1.5e-3
*set,bs3_radius,0.3e-3
*set,bs3_dist,1.27e-3
*set,bs3_nb,26
*set,bs3_height,0.4e-3
*set,bs3_side,4.125e-3                      !定义大小芯片之间的中心距离
*set,d_dist,11.5e-3
*set,pcb_length,100e-3                      !定义 pcb 的尺寸
*set,pcb_height,1.5e-3                      !定义热扩散面的尺寸
*set,hs_length,40e-3
*set,hs_thick,1.5e-3                        !定义粘结剂的厚度
*set,sa_height,0.15e-3                      !定义热介质材料的厚度
*set,tim_height,0.15e-3                     !定义水冷板的长度
*set,cool_length,60e-3                      !定义水冷板的厚度
*set,cool_thick,1e-3                        !定义水冷板内空间的高度
*set,cool_height,6e-3                       !定义水冷板入口的内径
*set,in_inner,4e-3                          !定义水冷板入口的外径
*set,in_outer,6e-3                          !定义水冷板入口中心与水冷板边缘的距离
*set,in_dist,4e-30                          !定义水冷板入口的高度
*set,in_height,10e-3                        !定义水冷板出口的内径
*set,out_inner,4e-3                         !定义水冷板入口的外径
*set,out_outer,6e-3                         !定义水冷板出口中心与水冷板边缘的距离
*set,out_dist,4e-3                          !定义水冷板出口的高度
*set,out_height,10e-3
/prep7                                      !进入前处理
et,1,fluid141                               !定义二维热流体单元
mp,KXX,1,0.613                              !编号为 1 的材料的热导率
mp,KXX,2,82                                 !定义芯片的热导率
mp,KXX,3,36                                 !定义芯片凸点的热导率
mp,KXX,4,0.2                                !定义基板的热导率
mp,KXX,5,50                                 !定义基板下焊料球的热导率
mp,KXX,6,8.37                               !定义 pcb 的热导率
mp,KYY,6,0.32
mp,KXX,7,390                                !定义热扩展面 cu 的热导率
mp,KXX,8,1.1                                !定义粘结剂的热导率
mp,KXX,9,1                                  !定义热介质材料的热导率
mp,KXX,10,240                               !定义水冷板的热导率
csys,4                                      !建立几何模型
rect,0,pcb_length/2,0,pcb_height            !建立 pcb 模型
wpoff,bs3_dist/2,pcb_height+bs3_height/2    !建立焊球模型
pcirc,bs3_radius,,0,360
wpoff,-bs3_dist/2,bs3_height/2
```

```
rect,0,sub_length/2,0,sub_height                    ! 建立基板模型
aovlap,all                                          ! 重叠 pcb,焊球、基板的面积
numcmp,all
asel,s,loc,y,0,sub_height
aadd,all
asel,s,loc,y,-(pcb_height+bs3_height),-bs3_height
aadd,all
asel,all
aglue,all
asel,s,loc,y,-bs3_height,0
agen,bs3_nb/2,all,,,bs3_dist,,,0
wpoff,0,sub_height
wpoff,bs1_dist/2,bs1_height/2
pcirc,bs1_radius,,0,360
wpoff,-bs1_dist/2,bs1_height/2
rect,0,d1_length/2,0,d1_height
asel,s,loc,y,-(sub_height+bs1_height),d1_height
aovlap,all
asel,s,loc,y,-(sub_height+bs1_height),-bs1_height
aadd,all
asel,s,loc,y,0,d1_height
aadd,all
asel,s,loc,y,-(sub_height+bs1_height),d1_height
aglue,all
asel,s,loc,y,-bs1_height,0                          ! 根据 x,y 坐标选择小芯片下凸点面积
agen,bs1_nb/2,all,,,bs1_dist,,,0                    ! 沿 x 方向复制凸点面积
wpoff,d_dist-d2_length/2                            ! 建立小芯片上的介质材料模型
rect,0,d2_length,0,d2_height                        ! 建立大芯片上的介质材料模型
wpoff,bs2_side,-bs2_height/2
pcirc,bs2_radius,,0,360
wpoff,-bs2_side,bs2_height/2                        ! 建立热扩散面模型
asel,s,loc,y,-(sub_height+bs2_height),d2_height
asel,r,loc,x,0,d2_length
aovlap,all
asel,s,loc,y,-(sub_height+bs2_height),-bs2_height
aadd,all
asel,s,loc,y,0,d1_height
asel,r,loc,x,0,d2_length
aadd,all
asel,s,loc,y,-(sub_height+bs2_height),d2_height
asel,r,loc,x,0,d2_length
aglue,all
asel,s,loc,y,-bs2_height,0
```

```
asel,r,loc,x,0,d2 _ length
agen,bs2 _ nb,all,,,bs2 _ dist,,,,0
wpoff,o,d2 _ height
rect,0,d2 _ length,0,tim _ height
wpoff,-(d _ dist-d2 _ length/2)
rect,0,d1 _ length/2,0,tim _ height
wpoff,o,tim _ height
rect,0,hs _ length/2,0,hs _ thick
*set,hs _ height,tim _ height+d1 _ height+bs1 _ height-sa _ height
rect,sub _ length/2-hs _ thick,sub _ length/2,0,-hs _ height
rect,sub _ length/2-hs _ thick,sub _ length/2,-(hs _ height+sa _ height),-hs _ height
allsel,all                                      ! 用对称复制另外一半
arsym,x,all
wpoff,o,hs _ thick                              ! 建立热扩散面上,水冷板下面的介质材料模型
rect,-hs _ length/2,hs _ length/2,0,tim _ height
wpoff,o,tim _ height                            ! 以下建立水冷板和流体模型
rect,-cool _ length/2,cool _ length/2,0,cool _ height+cool _ thick*2
wpoff,o,cool _ thick
rect,-cool _ length/2+cool _ thick,cool _ length/2-cool _ thick,0,cool _ height
wpoff,cool _ length/2-in _ dist,cool _ height+cool _ thick
rect,-in _ outer/2,in _ outer/2,-cool _ thick,in _ height
rect,-in _ inner/2,in _ inner/2,-cool _ thick,in _ height
wpoff,in _ dist-cool _ length+out _ dist
rect,-out _ outer/2,out _ outer/2,-cool _ thick,out _ height
rect,-out _ inner/2,out _ inner/2,-cool _ thick,out _ height
asel,s,loc,y,-cool _ height+cool _ thick*2,in _ height
aovlap,all
allsel,all
numcmp,all
asel,s,,,72                                     ! 将重叠后属于水冷板的面积加起来
asel,a,,,73
asel,a,,,76
asel,a,,,80
asel,a,,,81
aadd,all
asel,s,,,74
asel,a,,,75
asel,a,,,77
asel,a,,,78
asel,a,,,79
aadd,all
asel,s,,,68                                     ! 将重叠后属于流体的面积加起来
asel,a,,,69
```

```
asel,a,,,70
asel,a,,,71
asel,a,,,82
aadd,all
asel,all
aglue,all                          ! 全体面积粘合在一起
numcmp,all
csys,0                             ! 偏移工作平面至总体坐标系原点
wpave,0,0,0
csys,4
! 赋予材料属性
! 偏移坐标到适当位置,根据坐标依次选取对应不同材料的面积,并赋予材料属性
! 其中流体必须赋予为材料编号为 1
asel,s,loc,y,0,pcb_height
aatt,6,,1,0
asel,s,loc,y,pcb_height,pcb_height+bs3_height
aatt,5,,1,0
asel,s,loc,y,pcb_height+bs3_height,pcb_height+bs3_height+sub_height
aatt,4,,1,0
wpoff,0,pcb_height+bs3_height+sub_height
asel,s,loc,y,0,bs1_height
asel,r,loc,x,-sub_length/2+hs_thick,sub_length/2-hs_thick
aatt,3,,1,0
asel,s,loc,y,0,sa_height
asel,r,loc,x,-sub_length/2,-sub_length/2+hs_thick
aatt,8,,1,0
asel,s,loc,y,0,sa_height
asel,r,loc,x,sub_length/2-hs_thick,sub_length/2
aatt,8,,1,0
asel,s,loc,y,bs1_height,bs1_height+d1_height
asel,r,loc,x,-sub_length/2+hs_thick,sub_length/2-hs_thick
aatt,2,,1,0
wpoff,0,bs1_height+d1_height+tim_height
asel,s,loc,y,-tim_height,0
asel,r,loc,x,-sub_length/2+hs_thick,sub_length/2-hs_thick
aatt,9,,1,0
asel,s,loc,y,-hs_height,0
asel,r,loc,x,-sub_length/2,-sub_length/2+hs_thick
aatt,7,,1,0
asel,s,loc,y,-hs_height,0
asel,r,loc,x,sub_length/2-hs_thick,sub_length/2
aatt,7,,1,0
asel,s,loc,y,0,hs_thick
```

```
aatt,7,,1,0
asel,s,loc,y,hs_thick,hs_thick+tim_height
aatt,9,,1,0
asel,s,,,53
asel,a,,,66
aatt,10,,1,0
asel,s,,,54
aatt,1,,1,0
asel,all
/pnum,area,1
/pnum,mat,1
/number,1
csys,0
wpave,0,0,0
csys,4
```

通过上述命令所建立的 MCM 液体间接冷却的二维模型见图 5-13。

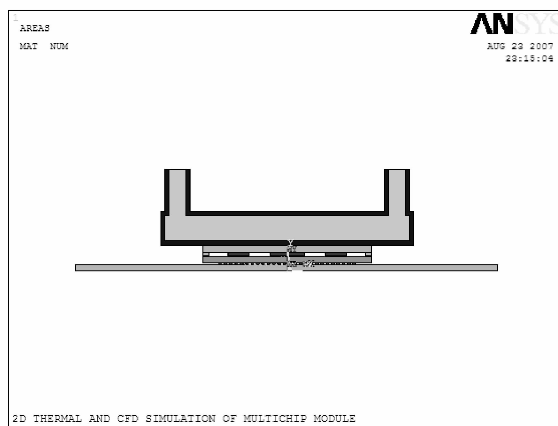


图 5-13　二维几何模型

```
! 划分网格,采用自由网格化和二维四边形划分网格
smrt,6
mshape,0,2d
mshkey,0
amesh,all
finish
/solu                          ! 施加载荷并求解
asel,s,,,62                    ! 施加大芯片的热源边界条件
asel,a,,,63
bfa,all,hgen,360.6e6
asel,s,,,64                    ! 施加小芯片的热源边界条件
asel,a,,,65
bfa,all,hgen,369.2e6
```

```
lsel,s,,,329
dl,all,,vy,-1
dl,all,,temp,15
lsel,s,,,331                  ! 施加水出口压强边界条件
dl,all,,pres,0                ! 施加 mcm 模型外部对流换热边界条件
lsel,s,,,1,2
lsel,a,,,4
lsel,a,,,163,168,5
lsel,a,,,194
lsel,a,,,319
lsel,a,,,323,324
lsel,a,,,343,346,3
lsel,a,,,353,363,2
lsel,a,,,364,365
lsel,a,,,367
lsel,a,,,373,375,2
lsel,a,,,404,406
lsel,a,,,419,421,2
sfl,all,conv,10,,25
allsel,all
fldata1,solu,flow,1           ! 设置求解选项包括流场
fldata1,solu,temp,1           ! 设置求解选项包括温度场
fldata1,solu,turb,1           ! 设置求解选项为湍流
fldata2,iter,exec,100         ! 设置求解迭代次数为 100
fldata7,prot,dens,constant    ! 设置流体水的密度
fldata8,nomi,dens,997
fldata7,prot,visc,constant    ! 设置流体水的黏度
fldata8,nomi,visc,8.55e-4
fldata7,prot,cond,constant    ! 设置流体水的热导率
fldata8,nomi,cond,0.613
fldata7,prot,spht,constant    ! 设置比热容
fldata8,nomi,spht,4179
fldata24,turb,modl,2          ! 设置湍流模型为零方程模拟
fldata24,turb,rati,2          ! 设置湍流比为 2
fldata18,meth,temp,4          ! 设置温度的计算方法
solve                         ! 求解
finish
/post1
set,last                      ! 读入最后一步的计算结果
plnsol,temp,,0                ! 查看总体温度分布图(见图 5-14)
plvect,v,,,,vect,elem,on,0    ! 查看流体流速矢量图(见图 5-15)
finish
```

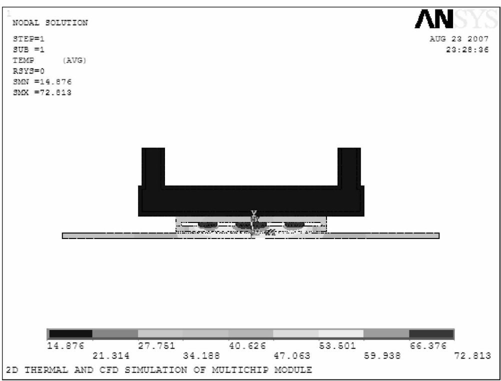


图 5-14 总体温度分布图

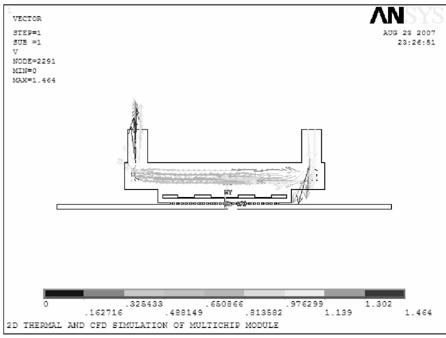


图 5-15 流体流速矢量图

5.3 本章总结

通过本章的学习，可以懂得关于耦合场模拟的基本理论，还可以学会使用 ANSYS 软件对耦合场，特别是热—结构耦合场进行分析求解，并熟悉相应的操作步骤及相关命令。

5.4 练习题

1）如图 5-16 所示，复合板由不同材料构成，每种材料的热膨胀系数不同，因此加热膨胀会产生应力差别，造成板弯曲变形。单元：采用热—结构分析常用单元，Plane55。几何参数：单位为 cm。边界条件：板左端刚性固定而且绝热，板右端自由同样绝热。上下两边处于恒定温度场，大小如图 5-16 所示。两种材料之间理想粘合，不会开裂。材料参数见图 5-16。要求：得到复合板的温度场、应力场(主应力和等效应力)，最大应力位置。提示：涉及热—应力耦合分析，需要进行耦合分析；注意所用参数单位！

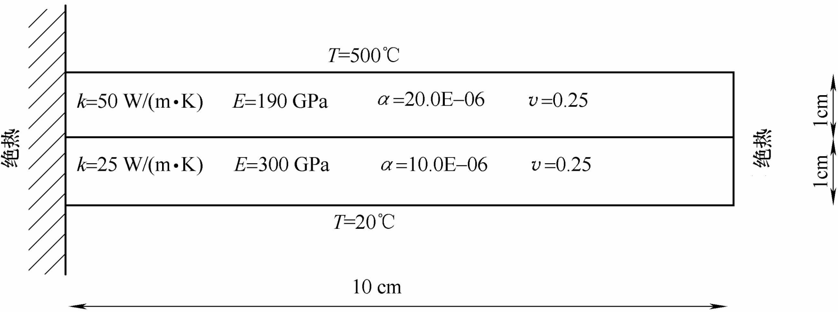


图 5-16 热—结构耦合分析

2）有一无限长圆筒，其横截面结构如图 5-17 所示，筒内壁温度为 200℃，外壁温度为 20℃，圆筒材料参数见表 5-4，求圆筒内的温度场、应力场分布。

表 5-4 材料性能参数

弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	线膨胀系数 α/K^{-1}	热导率 K/[W/(m·K)]
220	0.28	1.3e−6	70

3）平均半径 $r=150\text{mm}$，厚度 $t=10\text{mm}$ 的管道，为了消除由于温度变化引起的温度应力，每 27m 长度上设置一个膨胀弯管。在轴线上的对称位置切开管道，取一半模型进行计算，轴线尺寸示意图如图 5-18 所示。已知材料的弹性模量 $E=207\text{GPa}$，泊松比 $\nu=0.3$，热膨胀系数 $\alpha=6\times10^{-6}\text{K}^{-1}$，试用壳单元 SHELL63 计算在内压 $p=0.2\text{MPa}$ 作用下，温度升高了 80℃时，膨胀弯管内的最大应力。并以此结果评价膨胀弯管对轴向应力的影响。

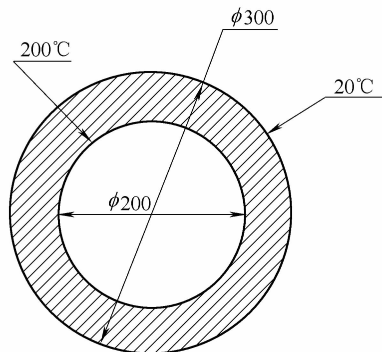


图 5-17　圆筒横截面结构示意图

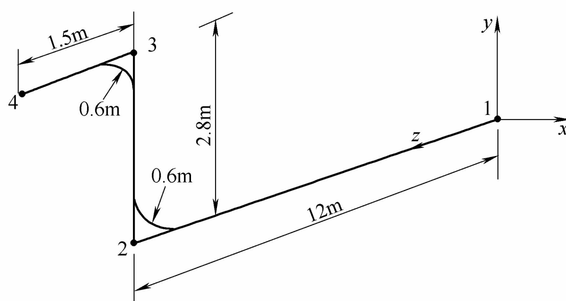


图 5-18　在温度和内压作用下的膨胀弯管计算模型示意图

4）端部有间隙的杆的热膨胀，在两个相距 3.002m 的平行刚性壁之间，有一根铝合金杆一端固定在刚性壁上，在 1℃时杆件另一端距离刚性壁 $\delta=2\text{mm}$（如图 5-19 所示）。当温度升高到 77℃，试确定杆件内部的温度应力。弹性模量 $E=72.4\text{GPa}$，泊松比为 0，热膨胀系数 $\alpha=2.25\times10^{-5}\text{K}^{-1}$。

5）在长厚壁圆筒的内表面和外表面上施加 T_i 和 T_o 的温度（见图 5-20）。确定壁厚上的温度分布。求解轴向应力 σ 和切向应力 σ。材料性能见表 5-5。

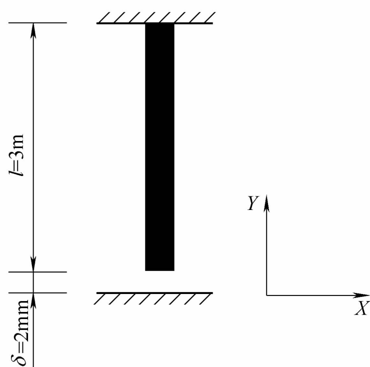


图 5-19　端部有间隙的杆的热膨胀

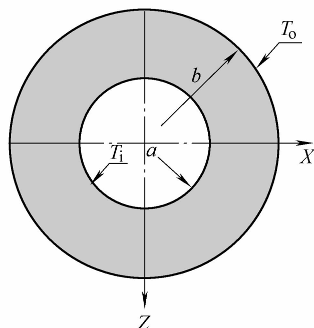


图 5-20　圆筒截面结构示意图

表 5-5　材料性能参数

材料属性	几何属性	载荷
$E=30\times10^6\text{psi}$ $\alpha=1.435\times10^{-5}\text{K}^{-1}$ $\upsilon=0.3$ $k=3\text{Btu/hr}\cdot\text{in}\cdot℃$	$a=0.1875\text{ in}$ $b=0.625\text{in}$	$T_i=-1℃$ $T_o=0℃$

6）一个钢制杆件，开始时内部应力为零，两端被固定在实体结构上，实体温度为 0℃。现在，两个实体中的一个开始升温，温度达到 75℃。由于两个实体之间的温度差必然出现热传导，随着实体之间的热传导，杆的温度出现变化，由温度变化引起杆的体积膨胀。由于杆两端固定在实体上，不能自由伸缩，因此杆内部应力出现变化。求解最终杆应力值。对问题进行合理简化。杆件只是温度变化，杆两端温度差为 75℃，不受外力载荷。材料的弹性模量为 200GPa，热导率为 60.5W/(m·K)，热膨胀系数为 $12e^{-6}K^{-1}$。模型如图 5-21 所示。

7）使用 FSSOLV 进行流体—结构分析的实例，一个细长梁放置在流道内如图 5-22 所示。分析梁上下的压力差引起梁的变形。

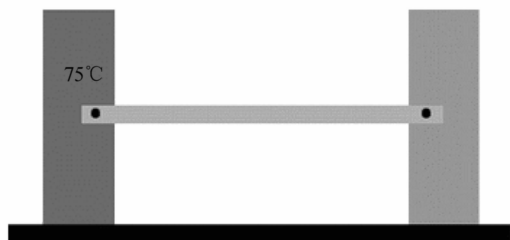


图 5-21　热—应力耦合分析模型

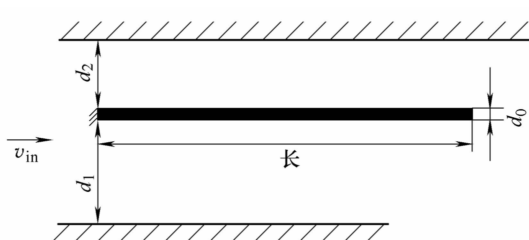


图 5-22　水流过细长的铝梁

8）直接加载温度载荷的热应力分析—双金属簧片，温度调节器所使用的双金属簧片的计算简图如图 5-23 所示，两簧片等厚度、等宽度，材料不同，二者紧密连成体，其左端可视为固定端。第 1 个金属片为钢制，其弹性模量 $E_1=2\times10^{11}$Pa，线膨胀系数 $\alpha_1=1.0\times10^{-5}$ K^{-1}；第 2 个金属片为铜制，其弹性模量 $E_2=1.1\times10^{11}$Pa，线膨胀系数 $\alpha_2=1.6\times10^{-5}K^{-1}$。簧片各部分尺寸为长度 $L=40$mm，高度 $h=0.5$mm。试分析温度升高 $\Delta t=100$℃时簧片自由端的挠度。

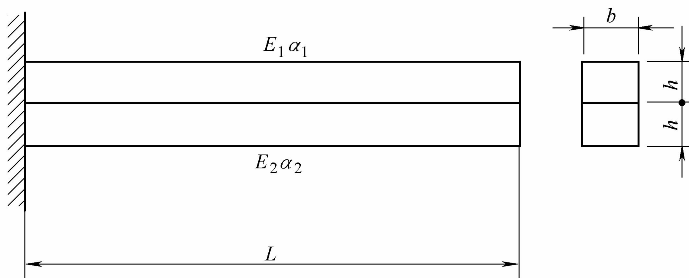


图 5-23　双金属簧片示意图

9）某液体管路内部通有液体，外部包裹有保温层，保温层与空气接触如图 5-24 所示，已知管路由铸铁制造，其热导率为 70W/(m·K)，弹性模量为 $2\times10^{11}N/m^2$，泊松比为 0.3，热膨胀系数为 $12\times10^{-6}K^{-1}$，保温层的热导率为 0.02W/(m·K)，弹性模量为 $2\times10^{10}N/m^2$，泊松比为 0.4，热膨胀系数为 $1.2\times10^{-6}K^{-1}$；管路内液体压力为 0.2MPa，温度为 70℃，表面传热系数为 $1W/(m^2\cdot K)$；空气温度为 −40℃，表面传热系数为 $0.5W/(m^2\cdot K)$。试分析管路内的热应力情况。

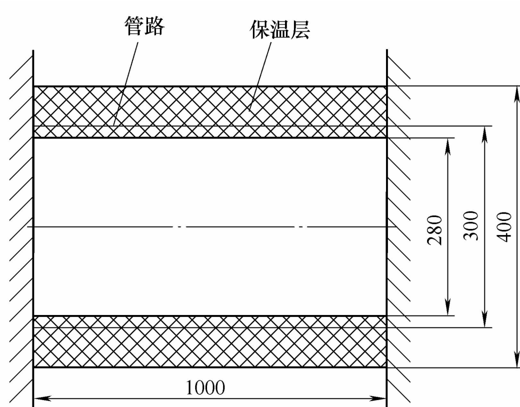


图 5-24　液体管路示意图

第 6 章　基于 ANSYS 软件的板料成形数值模拟

6.1　板料成形过程数值模拟基本理论

板料成形是对金属板料在室温下加压以获得所需形状和尺寸零件的成形方法，习惯上称为冲压或冷冲压(见表 6-1)。板料成形是材料加工成形的一个重要分支，它广泛应用于汽车、航天、航空、家电等各个领域。随着现代工业的发展，板料成形件越来越复杂，人们对板料成形的质量和速度的要求也越来越高。传统板料成形模具的设计依赖的是经验和直觉，并且通过反复试验调试来保证成形的质量。这不仅需要消耗大量的人力物力，而且周期长、效率低，不能适应社会发展的需要。20 世纪 70 年代以来，人们逐渐以数值模拟技术为辅助设计手段，大大降低了生产制造的成本。然而，由于板料成形是一种复杂的力学过程，其中包含几何非线性、材料非线性、接触非线性等强非线性问题，影响的参数非常多，这对数值模拟技术提出了极大的挑战。虽然目前板料成形的数值模拟软件已经商业化，但板料成形的模拟技术还不够完善，仍然是国内外研究的热点。

表 6-1　金属板料成形方法

分　　类		成形方法	简　　图	特点及应用范围
板料成形	分离工序	落料	废料　零件	用模具沿封闭轮廓线冲切，冲下部分是零件。用于制造各种平板零件或者成形工序制坯
		冲孔	零件　废料	用模具沿封闭轮廓线冲切，冲下部分是废料。用于冲制各类零件的孔形
	成形工序	弯曲		把板料沿直线弯曲成各种形状，板料外层受拉应力，内层受压应力。可加工形状复杂的零件
成形工序	拉深			法兰区坯料在切向压应力、径向拉应力作用下向直壁流动，制成筒形或带法兰的筒形零件
	胀形			平板毛坯或者管坯在双向拉应力作用下产生双向伸长变形。用于成形凸包、凸筋或鼓凸空心零件

（续）

分类		成形方法	简图	特点及应用范围
成形工序	翻边			预先冲孔的板料或未经冲孔的板料上，在双向拉应力作用下产生切向伸长变形，冲制带有直边的空心零件

金属板料冲压成形是利用金属塑性变形的特点，通过对金属板料施加压力，使其产生塑性变形从而获得所需要的形状。由于板料冲压成形过程包含大位移、大变形等十分复杂的物理现象，使得对其成形控制非常困难，以前更多的是通过反复试验的方法制造出合乎要求的产品，其过程需要花费大量的时间和经费。随着有限元模拟技术的迅速发展，利用有限元软件模拟金属板料冲压成形过程及分析其回弹量已成为可能。

薄板冲压过程的物理描述：在模具各部件（通常是凸模、凹模和压料板）的共同作用下，板料发生大变形，板料成形的变形能来自强迫模具部件运动的功，而能量的传递完全靠模具与板料的接触和摩擦。由此可见，对于成形过程的模拟，软件的接触（contact）算法的理论和精度决定程序的可靠性，除此之外，由于板料的位移和变形很大，用来模拟板料的单元类型应满足这一要求。进行一定的假设：模具为刚体，模具的运动可直接作为冲压系统的位移边界条件。将冲压过程的物理模型转化为力学模型，即动量方程、边界条件、初始条件。可描述为：在给定的模具位移条件下，求得板料的位移函数，并在任意时刻同时满足动量方程、边界条件和初始条件。这已经是一般性的力学问题，可采用有限元的方法进行求解。

ANSYS/LS-DYNA 将显式有限元程序 LS-DYNA 和 ANSYS 程序强大的前后处理结合起来。用 LS-DYNA 的显式算法能快速求解瞬时大变形动力学、大变形和多重非线性准静态问题以及复杂的接触碰撞问题。使用本程序，可以用 ANSYS 建立模型，用 LS-DYNA 做显式求解，然后用标准的 ANSYS 后处理来观看结果。也可以在 ANSYS 和 ANSYS-LS-DYNA 之间传递几何信息和结果信息以执行连续的隐式—显式/显式—隐式分析，如坠落试验、回弹以及其他需要此类分析的应用。显式动态分析求解过程与 ANSYS 程序中其他分析过程类似，主要由三个步骤组成：①建立模型（用 PREP7 前处理器）；②加载并求解（用 SOLUTION 处理器）；③查看结果（用 POST1 和 POST26 后处理器）。

LS-DYNA 在分析冲压时模具定义为刚体，因此板料和模具都应用壳单元进行离散。LS-DYNA 的单元都采用拉格朗日增量方法进行描述。其壳单元算法共有 16 种，可用于板成形分析使用的单元有 11 种，可分类为四节点和三节点单元；单点积分、多点积分单元和缩减积分（select-reduced）单元。单元采用 co-rotational 坐标系统分离单元运动中的变形和刚体运动。使用单点积分的求解速度很快，一般都可得到可靠的结果。当单元的翘曲和弯曲变形较大时，可通过增加沿壳厚度方向的积分点数目保证精度。用于板料成形的材料模式是各种弹塑性材料，可考虑各向异性、强化特征。强化类型包括指数强化、随动强化、等向强化、混合强化以及应变率对材料强化的影响。应变率的影响归结为两种方式，采用 cowper-symonds 模型；以表格方式给定任意应变率下的应力—应变曲线。部分材料模式引用 hill 或 barlat 的各向异性屈服假设，并假定壳单元的平面应力状态，因此几乎专用于板成形模拟。并且还能够通过给定材料的 FLD（flow limit dia.）判断板料在拉深过程中局部开裂现象。

LS-DYNA 目前的接触类型有 30 余种，适用于板成形分析的有 12 种，都采用罚函数方

法(penalty)，在接触计算过程中考虑壳单元厚度及其变化。值得说明的是：拉深筋与板料接触(contact-drawbead)，可认为是非线性弹簧算法，需给定单位长度拉深筋对板料的阻力变化曲线。新增加三种接触类型(forming 类型接触)专用于板成形模拟，这些接触类型降低了对模具网格的连续性要求，并且计算速度更快。LS-DYNA 进行板成形分析时可选择使用 3-D adaptive mesh 功能，可在计算过程中对板料网格进行局部加密，网格加密的准则可选择为：板厚变化；曲率变化；单步长接触穿透深度值。

6.2 ANSYS 软件在板料成形模拟中的应用实例

6.2.1 实例 1—薄板多点成形模拟

无模多点成形(Multi-Point Forming,MPF)是板料三维曲面数字化成形新技术，其基本原理是有一系列规则排列的基本体点阵代替整体式冲压模具(即实现无模化)，通过数字化调形系统调整基本体单元高度形成所需要的成形面，实现板料的无模、快速、柔性化成形。与模具成形相比，在模具成形中板件由模具的成形面来成形；而多点成形时则由基本体单元的包络面(或称成形曲面)来完成。多点成形方法与传统模具成形方法的主要区别就是它具有“柔性”特点，即可控制各基本体单元的高度。利用这个特点，既可以在成形前也可在成形过程中改变基本体的相对位移状态，从而不仅可以实现无模成形，还可以改变被成形件的变形路径及受力状态，达到不同的成形结果。多点成形设备的这种柔性加工特点，比传统模具成形能为工件提供更多的变形路径，从而能够实现如分段成形、多道成形、闭环成形等诸多特色加工工艺。本例采用多点成形中的一个点来演示成形情况。图 6-1 为多点成形工艺示意图，板料的密度为 2850kg/m^3，弹性模量为 0.75e11Pa，泊松比为 0.3；冲头密度为 7800kg/m^3，弹性模量为 2e11Pa，泊松比为 0.3。由坐标原点(0.4,0.016)、(0.8,0.064)连接形成的螺旋线为板料的几何模型，单点冲头为刚体。

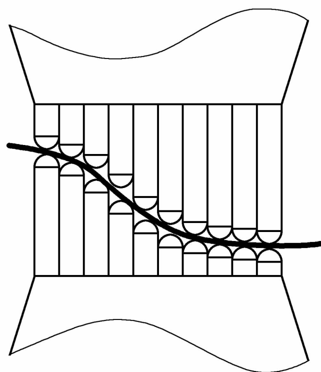


图 6-1 MPF 工艺示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex6 - 1
/prep7
et,1,plane162,,,2
mp,DENS,1,2850
mp,ex,1,0.75e11
mp,nuxy,1,0.3
edmp,rigid,2,6,7
mp,DENS,2,7800
mp,ex,2,2e11
mp,nuxy,2,0.3
```

```
k,1
k,2,0.4,0.016                          ! 关键点
k,3,0.8,0.064
bsplin,1,2,3
lgen,2,1,,,,-0.01
l,1,4
l,3,5
al,all
cyl4,0.4,0.04,0.01,180,0.02,360
type,1
mat,1
real,1
esize,0.005
mshape,0
mshkey,1
amesh,1                                ! 划分网格
mat,2
amesh,2
edpart,create
edcgen,assc
lsel,s,,,3
nsll,s,1
d,all,all
alls
*dim,ctime,array,2,1,1
*dim,disp,array,2,1,1
ctime(1,1)=0,0.11
disp(1,1)=0,-0.04
edload,add,rbuy,0,2,ctime,disp
finish
/solu                                  ! 求解
edenergy,1,1,1,1
time,0.1
edopt,add,,ansys
edrst,30
edhtime,100
solve
finish
/post26                                ! 后处理
nsol,2,495,u,y
nsol,3,83,u,y
prvar,2,3
finish                                 ! 应力分布(见图 6-2)
```

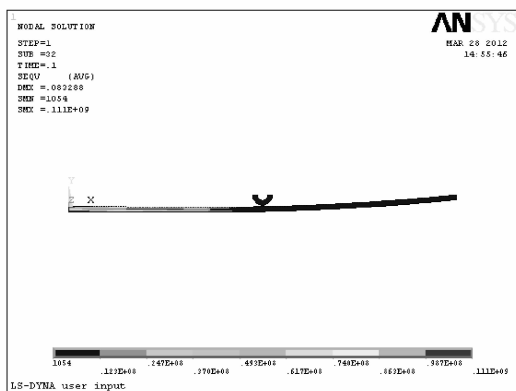


图 6-2 多点成形过程应力分布

6.2.2 实例 2—板料弯曲过程的二维仿真

在 ANSYS 环境下全参数化建模分析板料的弯曲过程，通过调整上下模参数使成形过程中不出现空隙。分为三工步：上模快速下降；板料接触下模后缓慢下压；拔模回弹。钢板冲压模型由两部分组成，分别是被冲压件钢板和冲压的刚性模具。在计算中采用刚—柔接触计算模型分析。把钢板假设为柔性件，模具为刚性件且不考虑其变形。计算中钢板采用双线性等向强化模型来考虑冲压过程中的弹塑性变形。金属板料的弹性模量为 17000MPa，泊松比为 0.3，摩擦系数为 0.2，板料的厚度为 8mm，长度为 115mm。冲压凸模的圆角半径为 5mm，冲压凹模的圆角半径为 10mm。

命令流如下：

```
/clear
  /filname,ex6 -2,1                          ! 定义工作文件名
 *afun,deg
x0 =0
y0 =0
z0 =0
hbl =8                                       ! 建模参数
hxbl1 =7.5
hxbl2 =7.5
hybl1 =7.5
hybl2 =7
xbl1 =25
xbl2 =40
ybl1 =28
ybl2 =80
ce0 =0.2
x1 =xbl1
x101 =x1 +6
x201 =x1 +xbl2 -11
```

```
x2 = x1 + xbl2
x4 = 200
x5 = 220
xct1 = x1 + hxbl1
xct101 = xct1 + 3
xct2 = x201 - hxbl2 + 3
xct201 = xct2 + 7
xct3 = xct201 + 50
y1 = ybl1
y2 = y1 + 10
y3 = ybl2
y4 = y3 + hbl + ce0 + 5
y5 = y4 + ybl1 - (hbl * 2 - hybl1 - hybl2)
y6 = y4 + ybl1 + 6
y7 = y6 + 58
r01 = 10
r02 = 8
r03 = 10
r04 = 10
r05 = 13
sit = 50
rct1 = 18
rct2 = 5
rct3 = 5
rct4 = 20
x3 = x2 + (y3 - y2) * cos(50)/sin(50)
dy1 = y4 - hbl
dy2 = dy1 + (hbl - hybl2) + 1
dy3 = dy2 - 5
/filname,ex6 - 3
/prep7
et,1,182
keyopt,1,3,3
et,2,169
et,3,172
et,4,169
et,5,172
et,6,169
et,7,172
mp,ex,1,17000                    ! 弹性模量
mp,prxy,1,0.3                    ! 泊松比
tb,bkin,1,1,2,1
tbtemp,0.0
```

```
tbdata,,30,0
mp,mu,2,0.2
mp,mu,3,0.2
mp,mu,4,0.2
r,1,2
r,2
r,2,,,0.3,0.1,0,
rmore,,,1.0e20,0.0,1.0,
rmore,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
rmore,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
nropt,unsym
keyopt,3,10,1
r,3
r,3,,,0.3,0.1,0,
rmore,,,1.0e20,0.0,1.0,
rmore,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
rmore,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
nropt,unsym
keyopt,3,10,1
r,4
r,4,,,0.3,0.1,0,
rmore,,,1.0e20,0.0,1.0,
rmore,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
rmore,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
nropt,unsym
keyopt,3,10,1
k,1,x0,y1,z0
k,2,x1,y1,z0
k,3,x101,y0,z0
k,4,x201,y0,z0
k,5,x2,y2,z0
k,6,x3,y3,z0
k,7,x5,y3,z0
l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,6
l,6,7
lfillt,1,2,r01
lfillt,2,3,r05
lfillt,3,4,r02
lfillt,4,5,r03
```

```
lfillt,5,6,r04
cm,tarbot,line
numcmp,kp
lsel,none
k,100,x3,y3 + hbl + ce0,z0
k,101,x5,y3 + hbl + ce0,z0
l,100,101
cm,tartop,line
numcmp,kp
numcmp,line
*get,lmaxn,line,0,num,max
lsel,none
k,100,x0,y5,z0
k,101,xct1,y5,z0
k,102,xct101,y4,z0
k,103,xct2,y4,z0
k,104,xct201,y6,z0
k,105,xct3,y7,z0
l,100,101
l,101,102
l,102,103
l,103,104
l,104,105
lfillt,lmaxn + 1,lmaxn + 2,rct1
lfillt,lmaxn + 2,lmaxn + 3,rct2
lfillt,lmaxn + 3,lmaxn + 4,rct3
lfillt,lmaxn + 4,lmaxn + 5,rct4
cm,tarct,line
numcmp,kp
k,100,100,150,z0
k,101,100,160,z0
k,102,100,170,z0
lsel,none
rectng,x0,x4,y3,y3 + hbl
aplo
cm,acont,area
lsel,s,loc,y,y3
cm,lconbot,line
lsel,s,loc,y,y3 + hbl
cm,lcontop,line
allsel
lplo
esize,3,0,
```

```
mshape,0,2d
mshkey,0
amesh,all
numcmp,node
cmsel,s,tarct
type,2
real,2
mat,2
lmesh,all
kmesh,102
*get,nct,node,0,num,max
cmsel,s,lcontop
nsll,s,1
esln,s,0
type,3
real,2
mat,2
esurf
cmsel,s,tartop
type,4
real,3
mat,3
lmesh,all
kmesh,101
*get,ntop,node,0,num,max
cmsel,s,lcontop
nsll,s,1
esln,s,0
type,5
real,3
mat,3
esurf
cmsel,s,tarbot
type,6
real,4
mat,4
lmesh,all
kmesh,100
*get,nbot,node,0,num,max
cmsel,s,lconbot
nsll,s,1
esln,s,0
type,7
```

```
real,4
mat,4
esurf
cmsel,s,tarbot
nsll,s,1
esln,s,1
esurf,,reverse
allsel
finish
/solu
antype,static
nlgeom,on
rescon,define,none
outres,all,all
nsubst,300,500,100
time,1
lsel,s,loc,x,x0
dl,all,,symm
d,nbot,all
d,ntop,all
d,nct,,-dy1,,,,uy
allsel
nplo
eplo
solve
time,2
nsubst,200,400,50
d,nct,,-dy2,,,,uy
allsel
solve
time,3
nsubst,200,400,50
d,nct,,-dy3,,,,uy
allsel
solve
finish                                    ！变形与应力分布(见图 6-3 和图 6-4)
```

6.2.3　实例 3—圆盘矫直过程的应变分析

两块钢板压一个镁合金圆盘(见图 6-5)的非线性分析，材料性质如下：EX = 45000MPa(弹性模量)；NUXY = 0.35(泊松比)；Yield Strength = 220MPa(屈服强度)；Tang Mod = 150MPa(剪切模量)。

图 6-3　弯曲过程的变形

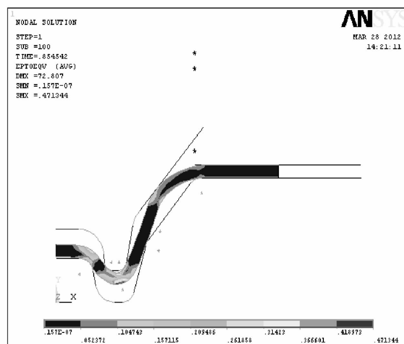


图 6-4　弯曲过程的应力分布

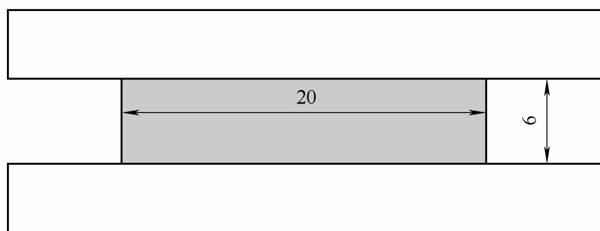


图 6-5　两块钢板压一个圆盘

上下两块钢板的刚度比圆盘的刚度大得多，钢板与圆盘壁面之间的摩擦足够大。因此，在建模时只建立圆盘的模型。用轴对称单元模拟圆盘，求解通过单一载荷步来实现。由于模型和载荷的上下对称性，只需建立圆盘的上半部分模型。由于钢板的刚度很大，因此在建模时将圆盘上面结点的 Y 方向上的位移耦合起来。又由于钢板与圆盘壁面之间的摩擦足够大，圆盘与钢板之间不会产生滑动，因此将圆盘上面结点的 X 方向的位移约束起来。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex6-3,1                                  ! 定义工作文件名
/title,straighting of disk made from magnesium alloy   ! 定义工作标题名
d=20                                              ! 输入圆盘的直径
h=6                                               ! 输入圆盘的厚度
/prep7
et,1,visco106                                     ! 选择单元类型
keyopt,1,3,1                                      ! 设置轴对称
mp,ex,1,45000                                     ! 输入弹性模量
mp,prxy,1,0.35                                    ! 输入泊松比
tb,biso,1,1,2
tbdata,,220,150                                   ! 输入屈服强度和剪切模量
save
rectng,0,d/2,0,h/2,                               ! 生成一个矩形面
lsel,s,,,1,3,2
```

```
lesize,all,,,25                                 ! 在长线上设置单元等份
lsel,s,,,2,4,2                                  ! 在短线上设置单元等份
lesize,all,,,10
amesh,all                                       ! 划分映射网格
/solu
antype,static                                   ! 设置分析类型为"static"
nsel,s,loc,y,h/2
cp,1,uy,all
nsel,all
lsel,s,,,1,4,3
dl,all,,symm
lsel,s,,,3
dl,all,,ux
allsel
lsel,s,,,3
nsll,s,1
*get,nc,node,,num,min
d,nc,uy,-0.5
allsel
nlgeom,on                                       ! 打开大应变选项
pred,on                                         ! 打开预测器选项
time,1                                          ! 输入迭代的终止时间
autots,1                                        ! 打开自动时间步长
nsubst,120                                      ! 输入迭代的子步数
outres,all,-10,                                 ! 设置输出控制
save
solve                                           ! 求解分析运算
finish
/post1
set,last                                        ! 取出最后一个子步的结果数据
/dscale,1,1
pldisp,2                                        ! 显示结构变形的动画
plnsol,nl,psv,0,1                               ! 显示塑性变形的能量(见图 6-6)
plnsol,s,eqv,0,1                                ! 显示节点的 von mises 应力
plnsol,epto,eqv,0,1                             ! 显示节点的总应变
finish
/post26                                         ! 进入时间历程后处理器
rforce,2,14,f,y,force                           ! 定义一个反作用力
add,2,2,,,n_force,,,-1,1,1,                     ! 对反作用力取正值
plvar,2                                         ! 显示反作用的变化(见图 6-7)
exit,all                                        ! 退出 ANSYS
```

6.2.4　实例 4—板料的弹性变形与回弹

一个弹性结构受压(接触)变形，直到发生塑性变形。拿开压缩板，结构回弹，但不会

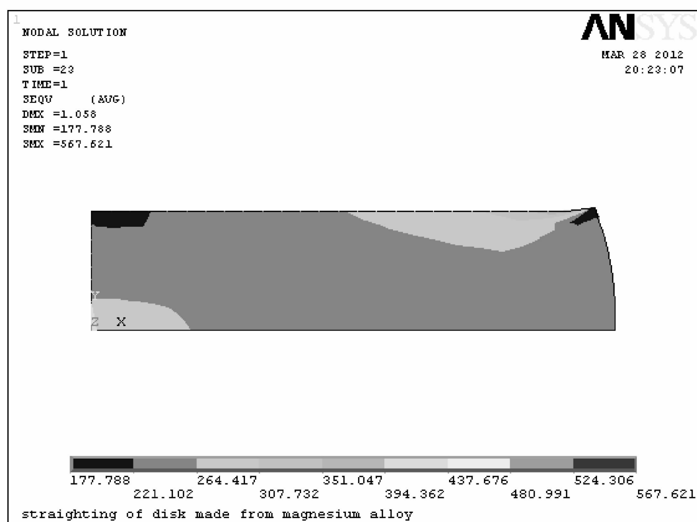


图 6-6 塑性变形的能量分布

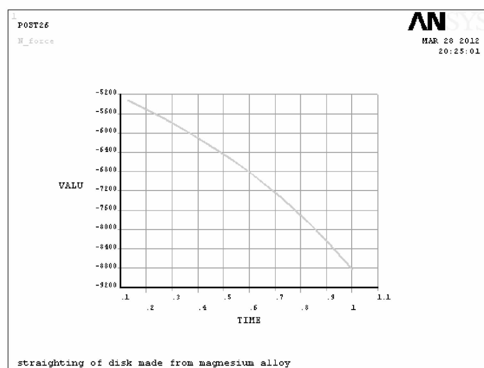


图 6-7 反作用的变化曲线

回到原始位置。计算蠕变，再压弹性结构到开始压缩位置。U 型金属的厚度为 0.2m，长度为 1.7m，U 型金属上有一个半球，半径为 0.25m，一个刚性板和半球接触并下压，板的长度为 2m，厚度为 0.029m。板料的弹性模量为 115e9Pa，泊松比为 0.3，屈服强度为 470e6Pa。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex6 -4,1                    ! 定义工作文件名
/prep7
et,1,182,,,3
mp,ex,1,115e9
mp,prxy,1,0.3
r,1,0.3
tb,bkin,1
tbdata,1,470e6,0
```

```
tm = 100
*set,c1,1.5625e-14                      ! 设置值
*set,c2,1.5
*set,c3,
*set,c4,0
tb,creep,1,,,6                          ! 激活数据表
tbdata,1,c1,c2,c3,c4                    ! 定义数据表
et,9,169                                ! 接触单元
et,10,171
r,9,,,0.1,0.1,,
mp,mu,9,0.0
k,,2                                    ! 几何条件
k,,2,0.2
k,,,0.2
k,,-0.2
k,,-0.2,1.2
k,,,1
k,,2,1.2
k,,1,1
k,,1.25,1
k,,2,1
l,8,9,
k,,1.5,1.2
k,,1.75,1.45
l, 1, 2
l, 1, 4
l, 4, 5
l, 5,11
larc,7,12,11,0.25
larc,11,12,7,0.25
l,7,10
l,10,9
l,8,6
l,6,3
l,3,2
lfillt,11,10,0.3,,
lfillt,4,5,0.5,,
lfillt,11,12,0.3,,
lfillt,4,3,0.5,,
lsel,,,,1,3.1
lcomb,all
rect,1,3,1.45+0.001,1.5
type,1
```

```
mat,1
esize,0.05
amesh,all
alls                                    ! 接触
type,10
mat,9
real,9
lsel,s,,,6,7
nsll,s,1
esln,s,0
esurf,all
type,9
mat,9
real,9
lsel,s,,,17
nsll,s,1
esln,s,0
esurf,all
lsel,s,,,3                              ! 边界条件
nsll,,1
d,all,ux
d,all,uy
lsel,s,,,19
nsll,,1
cp,11,uy,all
cplgen,11,ux
*get,nmin,node,,num,min
d,nmin,ux
ksel,s,,,10
nslk
*get,ndis,node,,num,min
finish
/solu
antype,static
nlgeom,on
autots,on
alls
save
rate,off
time,1e-8
d,nmin,uy,-0.3
nsub,20
outres,all,all
```

```
solve
 * get,rf1,node,nmin,rf,fy
 * get,dis1,node,ndis,u,y
time,2e-8
d,nmin,uy,0.0
nsub,20
outres,all,all
solve
 * get,rf2,node,nmin,rf,fy
 * get,dis2,node,ndis,u,y
rate,on
time,tm
outpr,basic,10
outres,esol,1
solve
 * get,rf3,node,nmin,rf,fy
 * get,dis3,node,ndis,u,y
rate,off
time,tm+1e-8
d,nmin,uy,-0.3
nsub,20
outres,all,all
solve                                    ！求解得到应力场分布(见图 6-8)
```

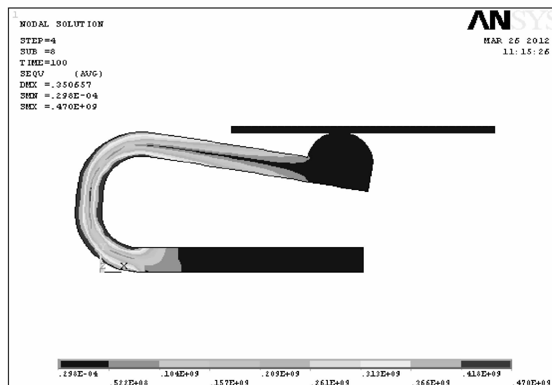


图 6-8　应力场分布

6.2.5　实例 5—厚板应变强化过程的塑性分析

一个周边简支的圆盘(见图 6-9)，在其中心受到一个冲杆的周期作用。由于冲杆被假定是刚性的，因此在建模时不考虑冲杆，而将圆盘上和冲杆接触的结点的 Y 方向上的位移耦合起来。由于模型和载荷都是轴对称的，因此用轴对称模型来进行计算。求解通过四个载荷步实现。材料性质：EX = 70000MPa(弹性模量)；NUXY = 0.325(泊松比)，塑性时的应力—

应变关系如下：

应变	应力/MPa
0.0007857	55
0.00575	112
0.02925	172
0.1	241

加载历史：

时间/s	载荷/N
0	0
1	-6000
2	750
3	-6000

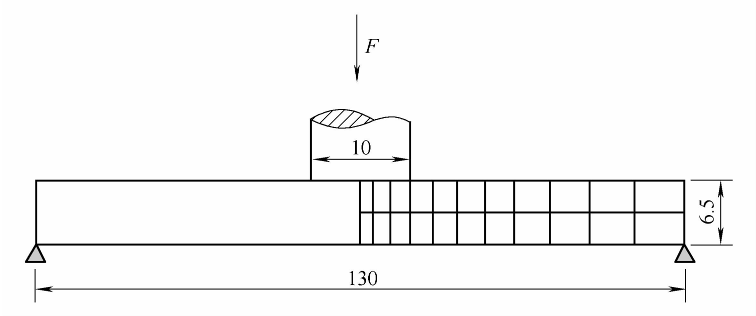


图 6-9 描述图

命令流如下：

```
/clear
prep7
/title,circular plate loaded by a circular punch-kinematic hardening
/filname,ex6 -5,1                    ! 定义工作文件名
exx =70000                           ! 下面定义建模分析时需要的参数
rpl =65
rpu =5
h =6.5
sts1 =55
stn1 =sts1/exx
sts2 =112
stn2 =0.00575
sts3 =172
stn3 =0.02925
sts4 =241
stn4 =0.1
nex =15
```

```
net = 2
nex1 = nint(0.8 * net)
nex2 = nex - nex1
et,1,42,,,1                    ! 定义单元 plane42,设置为轴对称
mp,ex,1,exx                    ! 定义材料属性
mp,nuxy,1,0.325
tb,kinh,1,1,4,                 ! 定义多线性随动强化准则
tbpt,,stn1,sts1
tbpt,,stn2,sts2
tbpt,,stn3,sts3
tbpt,,stn4,sts4
n,1,rpl,,,,,,                  ! 创建节点
n,2,0,,,,,,
n,3,,h/2,,,,,
k,1,,-(h/2),,                  ! 创建关键点
k,2,rpu,-(h/2),,
k,3,rpl,-(h/2),,
kgen,2,all,,,,h,,3,0           ! 复制并平移关键点
l,1,2                          ! 创建直线段
l,4, 5
l,2, 3
l,5,6
a,1,2,5,4                      ! 用关键点创建面
a,2,3,6,5
lesize,1,,,nex1                ! 对线进行网格控制
lesize,2, , ,nex1
lesize,3, , ,nex2,2.5
lesize,4,,,nex2,2.5
lesize,5,,,net
lesize,6,,,net
lesize,7,,,net
amesh,all                      ! 对面划分网格
nummrg,node,,,,low             ! 合并重复节点
numcmp,node
cp,1,uy,3,7,9                  ! 定义耦合自由度
d,1,uy                         ! 定义位移约束条件
nsel,s,loc,x,0
d,all,ux
nsel,all
/solu                          ! 开始求解
antype,0                       ! 指定分析类型
outres,all,all                 ! 设置输出控制
pred,on                        ! 打开预测器
```

```
f,3,fy,0                         ！施加并输出第一个载荷步
time,1e-6
autots,1
nsubst,1,,,1
kbc,0
lswrite,1,
f,3,fy,-6000                     ！施加并输出第二个载荷步
time,1
nsubst,10,,,1
lswrite,2,
f,3,fy,750                       ！施加并输出第三个载荷步
time,2
lswrite,3,
f,3,fy,-6000                     ！施加并输出第四个载荷步
time,3
lswrite,4,
lssolve,1,4,1,                   ！求解所有 4 个载荷步
finish
/post1                           ！进入通用后处理器
set,last                         ！选定最后一个载荷子步
pldisp,1                         ！绘制变形图
plnsol,eppl,eqv,1,1              ！绘制等效塑性应变(见图 6-10)
```

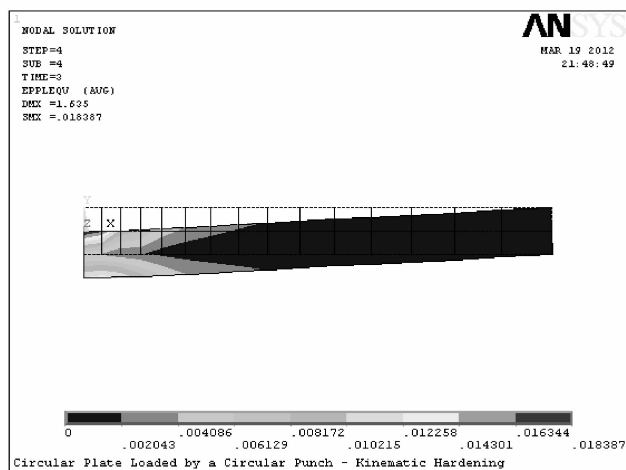


图 6-10 等效塑性应变

```
plnsol,epel,eqv,1,1              ！绘制等效弹性应变
/post26                          ！进入时间—历程后处理
esol,2,3,3,s,y,sy_2              ！定义变量
esol,3,3,3,epel,y,epely_3
esol,4,3,3,eppl,y,epply_4
add,5,3,4,,eptly                 ！对变量进行运算
```

```
/axlab,x,y-strain
/axlab,y,y-stress
xvar,5                              ! 绘制应力—应变曲线
plvar,2,
finish
```

6.2.6 实例 6—圆筒件液压胀形过程的弹塑性分析

有一个等厚度的后壁圆筒受到均布水压力作用，截面尺寸如图 6-11 所示，$a=100\text{mm}$，$b=105\text{mm}$。材料为理想弹塑性材料，$E=200\text{GPa}$，$\mu=0.3$，屈服强度为 200MPa。材料服从 von Mises 屈服条件。

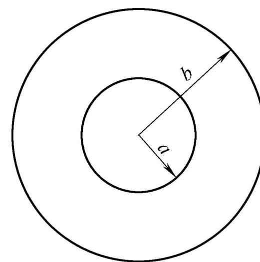


图 6-11　厚壁圆筒受内压的弹塑性分析

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex6-6                      ! 工作文件名
/prep7                              ! 前处理
et,1,183,,,2                        ! 单元类型
mp,ex,1,2e11                        ! 弹性模量
mp, prxy, 1,0.3                     ! 泊松比
tb,bkin,1,1
tbtemp,0
tbdata,1,500e6, 0
pcirc,0.1, 0.05,0,90                ! 生成圆环面
esize,0.003                         ! 单元步长
mshkey,1
mshape, 0
amesh,all                           ! 划分网格
finish
/solu                               ! 求解
dl,4,,uy
dl,2,,ux
autots,on
deltim,0.2,0.1,0.3
kbc,0
time,1                              ! 求解时间
sfl,3,pres,375e6                    ! 施加面载荷
lswrite
time,2
sfl,3,pres,0
lswrite
time,3
sfl,3,pres,250e6
lswrite
lssolve,1,3                         ! 求解
```

```
finish
/post1                                   ! 后处理
rsys,1
set,1
plnsol,s,eqv                             ! 等效应力场
path,p1,2
ppath,1,0,0.05
ppath,2,0,0.1
pdef,se,s,eqv,avg
plpath,se
set,2
pdef,sr,s,x
pdef,st,s,y
plpath,sr,st
set,3
plnsol,s,eqv                             ! 应力分布(见图 6-12)
finish
```

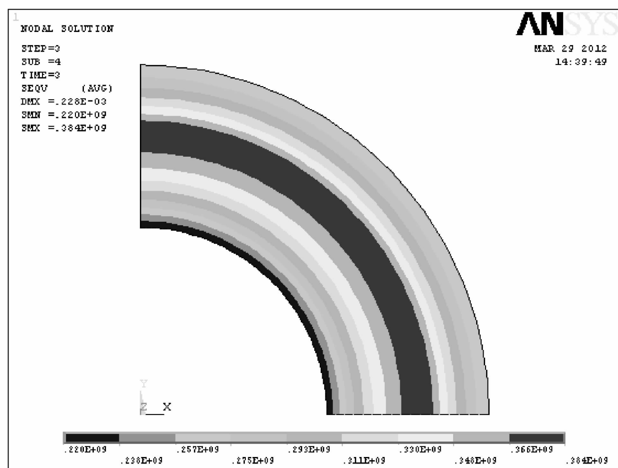


图 6-12 厚壁圆筒应力分布

6.2.7 实例 7—板料冲压成形及回弹

在金属成形过程中，最后的形状不仅仅取决于模具的轮廓形状，也取决于坯料在塑性变形时存储的弹性能总量。因为在变形部分存储的弹性能总量是许多过程参数（如材料性质、两表面间的载荷）的函数，在成形时期预测回弹是特别复杂的。冲压模拟分为两个阶段，第一个阶段为刚性模具进行冲压阶段，第二阶段为回弹计算，计算中假设整个过程为准静态。在计算回弹时采用微量卸载来保证数值计算的稳定性。DYNA 派生的另一个模块是薄板成形模块，此模块最大的特点是工艺化，以冲压工艺为线索对板成形过程进行定义，所用的语言完全是模具工程师熟悉的工艺语言，如凸模、凹模、拉深筋等，使他们感觉到数值模拟更像是设计的一部分，而不是在作分析。此模块中包括了板成形过程中所有能用有限元方法模拟

的因素。板料的弹性模量为 7e4Pa，泊松比为 0.325。冲头的弹性模量为 7e10Pa，泊松比为 0.3。冲头的高为 6.5mm，宽为 5mm，板料的高为 6.5mm，宽为 60mm。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex6-7
/prep7
*set,exx_p,7e4
*set,exx_t,7e10
*set,rp,65
*set,rt,5
*set,h,6.5
*set,sts1,55
*set,stn1,sts1/exx_p
*set,sts2,112
*set,stn2,0.00575
*set,sts3,172
*set,stn3,0.02925
*set,sts4,241
*set,stn4,0.1
*set,net,8
*set,nex,52
n,1,rp                    ! 几何实体建模
n,2
n,3,0,h/2
n,4,,h/2+0.1
k,1,,-(h/2)               ! 关键点
k,2,rt,-(h/2)
k,3,rp,-(h/2)
kgen,2,all,,,,h,,3
k,7,,h/2+0.1
k,8,rt,h/2+0.1
kgen,2,7,8,1,,h,,2
l,1,2                     ! 线
l,4,5
l,2,3
l,5,6
l,7,8
l,9,10
a,1,2,5,4                 ! 面
a,2,3,6,5
a,7,8,10,9
et,1,plane42,,,1          ! 选择单元
```

```
et,2,targe169
et,3,conta172
mp,ex,1,exx_p               ! 弹性模量
mp,prxy,1,0.325
mp,ex,2,exx_t
mp,prxy,2,0.3
tb,kinh,1,1,4,0
tbpt,,stn1,sts1
tbpt,,stn2,sts2
tbpt,,stn3,sts3
tbpt,,stn4,sts4
lsel,u,line,,3,4,1          ! 划分网格
lesize,all,,,net
lsel,s,line,,3,4,1
lesize,all,,,nex,2.5
mshkey,1
asel,s,loc,y,-h/2,h/2
amesh,all
asel,s,loc,y,h/2,100
mat,2
amesh,all
nummrg,node,,,,low
numcmp,node
mp,mu,1,0.35                ! 接触单元定义
mat,1
r,3
real,3
r,3,,,1,0.1,0
lsel,s,,,5
type,2
nsll,s,1
esln,s,0
esurf,all
lsel,s,,,2
type,3
nsll,s,1
esln,s,0
esurf,all
allsel,all
nsel,s,node,,1              ! 施加载荷
d,all,uy
d,all,ux
nsel,s,loc,x,0
```

```
d,all,ux
allsel,all
finish
/solu                                  ! 求解
antype,0
outres,all,all
nlgeom,on
autots,1
nsubst,100
nsel,s,loc,y,h/2 +0.1,100
d,all,uy, -4
allsel,all
solve
*get,def1,node,3,u,y
time,2
nsubst,100
nsel,s,loc,y,h/2 +0.1,100
d,all,uy,0
allsel,all
solve
*get,def2,node,3,u,y
disp_2d =def2 -def1
finish
/post1
set,1,last
plnsol,s,eqv
plnsol,nl,epeq                         ! 等效应力分布(见图 6-13)
```

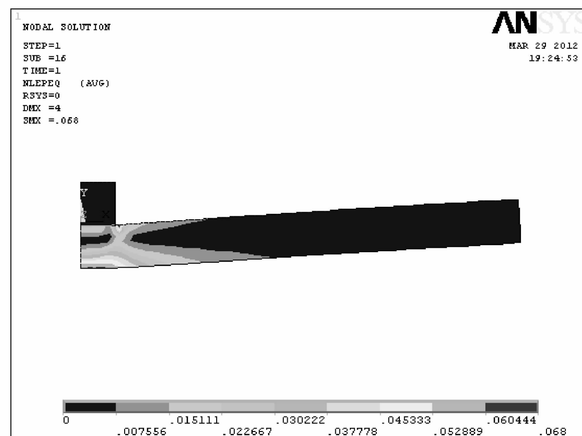


图 6-13　冲压后期应力分布

```
set,2,last
plnsol,s,eqv
```

```
plnsol,nl,epeq
nsort,s,eqv
*get,n_max_2d,sort,0,IMAX
/post26
ansol,2,n_max_2d,s,eqv,eqv_2d
plvar,2
```

6.2.8 实例 8—板料拉深成形及回弹

在汽车、航空、家电等工业部门，许多构件是用板料冲压成形生产的。板料成形过程涉及几何非线性、材料非线性和边界条件非线性的复杂力学问题。在多数动态金属成形工序中，高度非线性过程导致在坯料中产生大量的弹性应变能，存储的弹性能在成形压力消失后释放，使坯料向着原有几何构形变形。因此，在金属板料成形过程中最后的形状不仅仅取决于模具的轮廓形状，也取决于坯料在塑性变形时存储的弹性能总量。因为在变形部分存储的弹性能总量是许多过程参数（如材料性质,两表面间的载荷 ）的函数，在成形时期预测回弹是特别复杂的。ANSYS 提供的显式、隐式算法之间是可以自由切换的，可实现二者的优势互补。刚才的下压过程，可用显式方法求解，回弹问题切换到隐式求解。图 6-14 为板料拉深成形示意图。板料长度为 10mm，板厚为 0.1mm，冲头半径为 4mm，模具内半径为 5mm，弹性模量为 2e5MPa，密度为 7800e-9kg/mm^3，屈服强度为 200MPa，剪切模量为 2e3MPa。

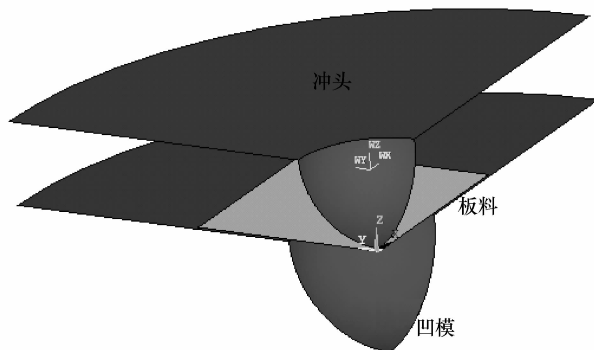


图 6-14 板料拉深成形示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex6-8
/vie,1,-1,-2,-1
/vup,1,z
/pnu,mat,1
/num,1
/esha,1
/dsc,1,1
a=10                    ! 板料成形几何参数,长度, mm
t=0.1                   ! 板厚,mm
r1=4                    ! 冲头半径
```

```
r2 = 5                  ! 模具内半径
E = 2e5                 ! 弹性模量,MPa
rho = 7800e - 9         ! 密度,kg/mm3
sy = 200                ! 屈服强度,MPa
e2 = 2e3                ! 剪切模量,MPa
n _ int = 5
esz = a/10              ! 单元尺寸
dz = - 3.5              ! 行程
t _ umax = 0.0005
gap _ 0 = t/2
/fil,explct
/prep7
rect,0,a,0,a            ! 板料模型
cm,plate _ a,area
aatt,1,1,1
wpof,0,0, - t           ! 拉深成形
cswp,11,1
cswp,12,2
sphere,r2,,0,90
vsbw,all
csys
vsel,s,loc,z, - t,r2
vdel,all,,,1
alls
vdel,all
asel,s,loc,x
asel,a,loc,y
asel,a,loc,z, - t
adel,all,,,1
csys,11
k,,2 * a
k,,2 * a,90
a,kp(r2,0,0),kp(2 * a,0,0),kp(2 * a,90,0),kp(r2,90,0)
alls
cmse,u,plate _ a
cm,die _ a,area
aatt,2,2,2
wpcs, - 1,0             ! 冲压
wpof,0,0,r1 + t + gap _ 0
cswp,21,1
cswp,22,2
sphere,r1,,0,90
vsbw,all
```

```
csys,21
vsel,s,loc,z,0,r1
vdel,all,,,1
alls
vdel,all
csys
asel,s,loc,x
asel,a,loc,y
csys,21
asel,a,loc,z,0
adel,all,,,1
csys,21
k,,2*a
k,,2*a,90
a,kp(r1,0,0),kp(2*a,0,0),kp(2*a,90,0),kp(r1,90,0)
alls
cmse,u,plate_a
cmse,u,die_a
cm,punch_a,area
aatt,3,3,3
et,1,163,10              ! 选择单元
et,2,163,1
et,3,163,1
mp,ex,1,E
mp,dens,1,rho
mp,nuxy,1,0.3
tb,biso,1
tbdata,1,sy
tbdata,2,e2
mp,ex,2,E                ! 材料性能
mp,dens,2,rho
mp,nuxy,2,0.3
mp,ex,3,E
mp,dens,3,rho
mp,nuxy,3,0.3
edmp,rigid,2,7,7
edmp,rigid,3,4,7
r,1,,n_int,t
r,2,,,t
r,3,,,t
esiz,esz                 ! 划分网格
alls
ames,all
```

```
csys,1
nsel,s,loc,x,0,1.5 * r2
esln
erefine,all,,,6
csys                    ! 边界条件
lsel,s,loc,x
dl,all,,ux
dl,all,,roty
dl,all,,rotz
lsel,s,loc,y
dl,all,,uy
dl,all,,rotx
dl,all,,rotz
alls                    ! 接触
edcg,ag
alls                    ! 冲头下压
edpart,create
*dim,tm,,2
*dim,u_punch,,2
tm(1)=0,t_umax
u_punch(1)=0,-(r1+t+gap_0)
edload,add,rbuz,,3,tm,u_punch
finish
/solu                   ! 求解
time,t_umax
solve
finish
/post1                  ! 最后一步的等效应力(见图 6-15)
set,last
plns,s,eqv
```

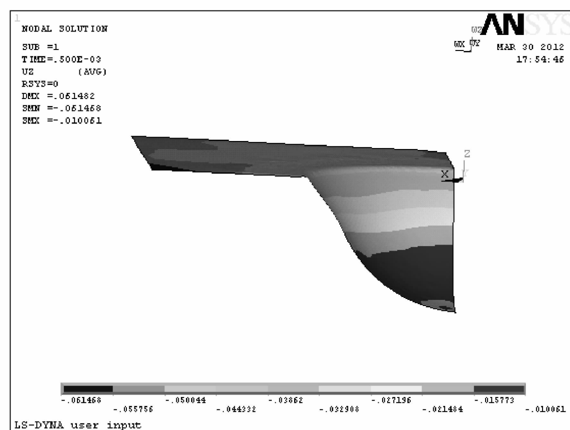


图 6-15　拉深后期板料应力分布

6.3 本章总结

通过本章的学习，可以懂得关于弹塑性模拟的基本理论，还可以学会使用 ANSYS 软件对弹塑性进行分析求解，并熟悉相应的操作步骤及相关命令。

6.4 练习题

1）塑性的概念和基本特性是什么？

2）橡胶圆盘超弹分析，一四周简支的橡胶圆盘承受均布压应力载荷 $P=0.5\text{MPa}$，如图 6-16 所示。试求圆盘内部的位移场及应力场分布（材料参数见表 6-2）。

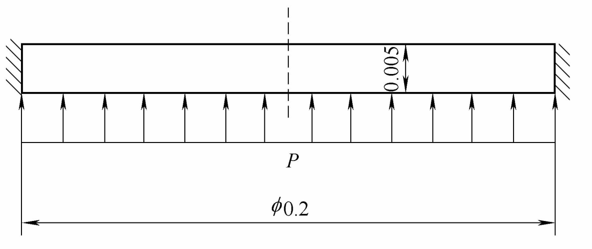


图 6-16 圆盘纵截面结构示意图

表 6-2 材料性能参数

E/MPa	PRXY	DENS/(kg/m^3)	C_1/MPa	C_2/MPa
69	0.3	2200	2	0.5

3）盆形件的冲压过程仿真，冲压模拟，一块板坯在压力机和冲模的作用下，生产一个盆（见图 6-17）。

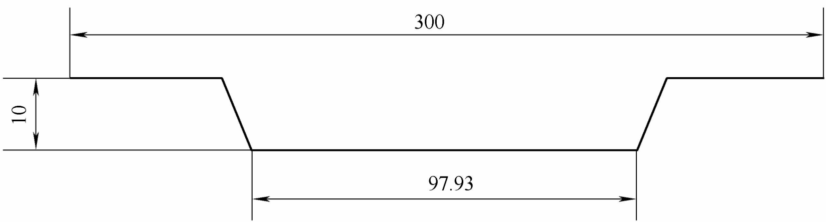


图 6-17 盆的几何外形

已知：板坯厚度为 0.005m；$\rho=7850\text{kg/m}^3$；$E=1.17\text{e}11\text{Pa}$（板坯）；$\sigma=0.36$（板坯）；$\sigma_Y=2\text{e}8\text{Pa}$（板坯）；$\sigma_{\tan}=1\text{e}9\text{Pa}$（板坯）；$E=2.1\text{e}11\text{Pa}$（模具）；$\sigma=0.3$（模具）。

求解：分析板坯冲压成形的应力分布。

第 7 章　基于 ANSYS 软件的体积成形数值模拟

7.1　体积成形工艺及 ANSYS 非线性接触技术

7.1.1　体积成形工艺

体积成形是指对金属块料、棒料或厚板在高温或室温下进行成形加工的方法，见表 7-1。

表 7-1　体积成形分类

成形方法	简　　图	特点及应用范围
锻造		用通用工具或模具对金属加压，通过金属体积转移和分配来获得零件或毛坯的成形方法。自由锻主要用于单件、小批量或大锻件生产；模锻适用于大批量生产
轧制		通过一对旋转坯料局部加压连续成形的加工方法。可以生产型材、板材和管材，也可利用其原理来生产零件或毛坯
挤压		通过模具使坯料在强烈压应力作用下从模孔中挤出以获得所需尺寸、形状和性能的制件。可生产各种型材或直接加工零件
拉拔		使金属通过凹模进行拉伸，得到其截面与凹模孔截面相同的棒料、管材或线材

锻压过程是金属体积成形过程，与板成形相比，其物理描述和力学模型中相同，但单元、材料、模具定义不同。在锻压过程中往往考虑模具的变形，单元采用实体单元，材料在多数情况下经历较大的温度变化，为热塑性材料。ls-dyna 的实体单元可分为三大类：①结构单元；②ale 单元(包括 euler 流体单元)；③声单元。进行锻压分析时要采用结构实体单元，这些单元可分为单点积分、多点积分和缩减积分(select-reduced)单元，节点带旋转自由

度(nodal rotations)和不带旋转自由度单元。单元采用 co-rotational 坐标系统分离单元运动中的变形和刚体运动，并在应力更新中采用 jaumann 应力率，避免因刚体运动产生应力。在剪切变形较大时，可选择使用 green-naphdi 应力率。变形结构单元为 8 节点 6 面体，可退化为 6 节点 5 面体或 4 节点 4 面体。ls-dyna 的热塑性材料通过列表给定不同温度下的材料性质，例如常用的一种各向同性热塑性材料可将整个温度范围分成 7 段，每个温度段内可定义不同弹性模量、泊松比、屈服应力、硬化模量、热膨胀系数等参数，这种材料采用线性硬化模式。材料的热性能(比热容、热导率等)可为各向同性或各向异性。在 ls-dyna 中结构材料和热材料的定义是分开的，并且在接触传热分析中定义相关热接触界面，因此可进行结构和热场的耦合分析。

在多数锻压分析中，随着金属件成形过程的继续，初始网格的变形逐渐加大，将导致单元精度降低甚至发生畸变，因此必须使用网格重新划分功能(remeshing)。网格重划分包括以下几个步骤：检查网格的变形程度，若超过规定的变形程度则停止计算，保存结果；检查需要改变位置的节点，调整节点位置，保证材料边界不变，材料内部节点可自由移动。将保存的结果映射到新的网格上。重新对网格初始化并进行计算。ls-dyna 对于二维与三维网格，皆提供重划分网格的功能。另外，ls-dyna 早已采用一种更为先进的网格 ale，即任意拉格朗日—欧拉网格。ale 网格进行 rezoning 的目的和过程与 remeshing 基本相同，但两者的网格描述存在本质差异(后者是拉格朗日网格)。ale 结合拉格朗日和欧拉网格各自的优点，已广泛用于结构材料的极度变形。有关 ale 的技术在下面详细说明。接触问题是一种高度非线性行为，需要较大的计算资源，为了进行实为有效的计算，理解问题的特性和建立合理的模型是很重要的。接触问题存在两个较大的难点：其一，在求解问题之前，不知道接触区域，表面之间是接触或分开是未知的、突然变化的，这随载荷、材料、边界条件和其他因素而定；其二，大多的接触问题需要计算摩擦，有几种摩擦模型可供选择，但它们都是非线性的，摩擦使问题的收敛性变得困难。

7.1.2　接触分类

接触问题分为两种基本类型：刚体—柔体的接触，柔体—柔体的接触。在刚体—柔体的接触问题中，接触面的一个或多个被当做刚体(与它接触的变形体相比,有大得多的刚度)，一般情况下，一种软材料和一种硬材料接触时，问题可以被假定为刚体—柔体的接触，许多金属成形问题归为此类接触。另一类柔体—柔体的接触，是一种更普遍的类型，在这种情况下，两个接触体都是变形体(有近似的刚度)。

ANSYS 支持三种接触方式：点—点，点—面，面—面，每种接触方式使用的接触单元适用于某类问题。为了给接触问题建模，首先必须认识到模型中的哪些部分可能会相互接触，如果相互作用的其中之一是一点，模型的对应组元是一个结点。如果相互作用的其中之一是一个面，模型的对应组元是单元，例如梁单元、壳单元或实体单元，有限元模型通过指定的接触单元来识别可能的接触对，接触单元是覆盖在分析模型接触面之上的一层单元，至于 ANSYS 使用的接触单元和使用它们的过程，下面分类详述。

1. 点—点接触单元

点—点接触单元主要用于模拟点—点的接触行为，为了使用点—点的接触单元，你需要预先知道接触位置，这类接触问题只能适用于接触面之间有较小相对滑动的情况(即使在几

何非线性情况下），如果两个面上的结点一一对应，相对滑动又可忽略不计，两个面挠度(转动)保持小量，那么可以用点—点的接触单元来求解面—面的接触问题，过盈装配问题是一个用点—点的接触单元来模拟面—面的接触问题的典型例子。

2. 点—面接触单元

点—面接触单元主要用于给点—面的接触行为建模，例如两根梁的相互接触。如果通过一组结点来定义接触面，生成多个单元，那么可以通过点—面的接触单元来模拟面—面的接触问题，面既可以是刚性体也可以是柔性体，这类接触问题的一个典型例子是插头到插座里。使用这类接触单元，不需要预先知道确切的接触位置，接触面之间也不需要保持一致的网格，并且允许有大的变形和大的相对滑动。Contact48 和 Contact49 都是点—面的接触单元，Contact26 用来模拟柔性点—刚性面的接触，对有不连续刚性面的问题，不推荐采用 Contact26，因为可能导致接触的丢失，在这种情况下，Contact48 通过使用伪单元算法能提供较好的建模能力。

3. 面—面的接触单元

ANSYS 支持刚体—柔体的面—面的接触单元，刚性面被当做“目标”面，分别用 Targe169 和 Targe170 来模拟 2—D 和 3—D 的“目标”面，柔性体的表面被当做“接触”面，用 Conta171、Conta172、Conta173、Conta174 来模拟。一个目标单元和一个接触单元叫做一个“接触对”程序，通过一个共享的实常数号来识别“接触对”，为了建立一个“接触对”，给目标单元和接触单元指定相同的实常数号。

与点—面接触单元相比，面—面接触单元有好几项优点：支持低阶和高阶单元；支持有大滑动和摩擦的大变形；协调刚度阵，计算单元提法不对称刚度阵的选项。为工程提供更好的接触结果，例如法向压力和摩擦应力。没有刚体表面形状的限制，刚体表面的光滑性不是必须允许有自然的或网格离散引起的表面不连续。与点—面接触单元比，需要较多的接触单元，因而需要较小的磁盘空间和 CPU 时间。允许多种建模控制，例如：绑定接触；渐变初始渗透；目标面自动移动到初始接触；平移接触面(老虎梁和单元的厚度)；支持死活单元。使用这些单元，能模拟直线(面)和曲线(面)，通常用简单的几何形状(如圆、抛物线、球、圆锥、圆柱)来模拟曲面，更复杂的刚体形状能使用特殊的前处理技巧来建模。

在涉及两个边界的接触问题中，很自然地把一个边界作为“目标”面，而把另一个作为“接触”面，对刚体—柔体的接触，“目标”面总是刚性的，“接触”面总是柔性面，这两个面合起来叫做“接触对”，使用 Targe169 和 Conta171 或 Conta172 来定义 2-D 接触对，使用 Targe170 和 Conta173 或 Conta174 来定义 3-D 接触对，程序通过相同的实常数号来识别“接触对”。

7.2　ANSYS 软件在体积成形模拟中的应用实例

7.2.1　实例 1—镁合金棒材冷挤压过程分析

图 7-1 所示为镁合金坯料和挤压模具结构示意图，坯料与模具之间的摩擦系数为 0.1，求挤压过程中坯料的应力—应变关系(见表 7-2)内部的应力场变化。

坯料材料参数：弹性模量：$E_1=82\text{GPa}$；泊松比：$\nu_1=0.35$；摩擦系数：$f=0.06$。

模具材料参数：弹性模量：$E_2=220\mathrm{GPa}$；泊松比：$\nu_2=0.4$；摩擦系数：$f=0.1$。

表 7-2 坯料的应力—应变

ε	0.01	1.01
σ/MPa	820	360

本实例属于状态非线性变形接触问题。在分析过程中根据轴对称件，选择挤压试样和模具纵截面的 1/2 建立几何模型；选择 CONTA172 接触单元和 TARGE169 目标单元以及 PLANE182 结构单元进行求解。

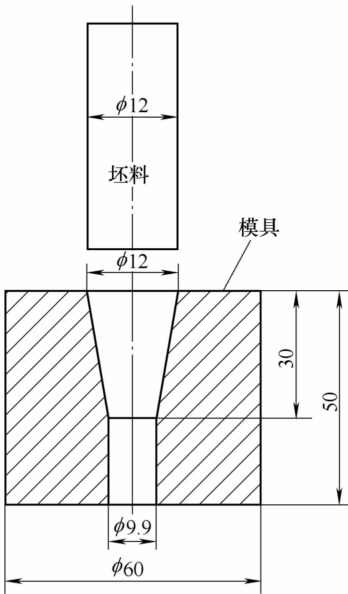


图 7-1 坯料与模具结构示意图

命令流文件：

```
/clear
/filname,ex7 -1                         ! 定义工作文件名
/title,magnesium extrusion              ! 定义工作标题
/prep7                                  ! 进入前处理器
/pbc,u,1
et,1,182
keyopt,1,3,1
rectng,0,6,,30                          ! 创建矩形面
rectng,4.95,30,-50,-20
k,9,6                                   ! 生成关键点
k,10,15
l,9,8                                   ! 由关键点生成线段
l,10,9
l,7,10
lsel,s,,,7,11,2                         ! 选择线段
lsel,a,,,10
al,all                                  ! 由所选线段生成面
lsel,s,,,2,4,2
lesize,all,,,30                         ! 将所选线段分为 50 等份
lsel,s,,,1,3,2
lesize,all,,,3
lsel,s,,,5,7,2
lsel,a,,,10
lesize,all,,,6
lsel,s,,,9,11,2
lesize,all,,10
lsel,s,,,6,8,2
lesize,all,,,15
amesh,all
lsel,s,,4,6,2
lsel,a,,,11
```

```
nsll,s,1
d,alll,ux
nsel,s,loc,y,-50
d,all,uy                              ! 施加位移约束
nsel,s,loc,y,30
d,all,uy,-30                          ! 施加位移载荷
alls
save,cont,db
resume,cont,db
mp,ex,1,6.9e10                        ! 输入挤压材料参数
mp,prxy,1,0.26
tb,miso,1
tbpt,,0.01,6.9e8
tbpt,,1.01,8.6e8
mp,mu,1,0.1                           ! 输入摩擦系数
mp,ex,2,3.6e11                        ! 输入模具材料参数
mp,prxy,2,0.3
mp,mu,2,0.1
/solu                                 ! 进入求解器
antype,static                         ! 定义求解类型
nlgeom,on                             ! 打开大应变选项
time,1                                ! 设置计算终止时间
nsub,20,10000,20                      ! 定义求解步数及求解步 1
outress,all,-20
finish
/prep7
mp,mu,1,0.2
r,2
real,2
et,2,169
et,3,172
keyopt,3,9,0
keyopt,3,12,0
lsel,s,,,8
lsel,a,,,9
cm,_target,line
type,2
nsll,s,1
esurf,all
lsel,s,,,2
cm,_contact,line
type,3
nsll,s,1
```

```
esurf,all
allsel
finish
/solu
solve                          ! 开始求解计算
/post1                         ! 进入 post1 后处理器
set,last
plnsol,s,eqv                   ! 绘制等效应力等值线图(见图 7-2)
plnsol,cont,sfric              ! 绘制摩擦应力等值线图(见图 7-3)
finish
exit, all                      ! 退出 ANSYS
```

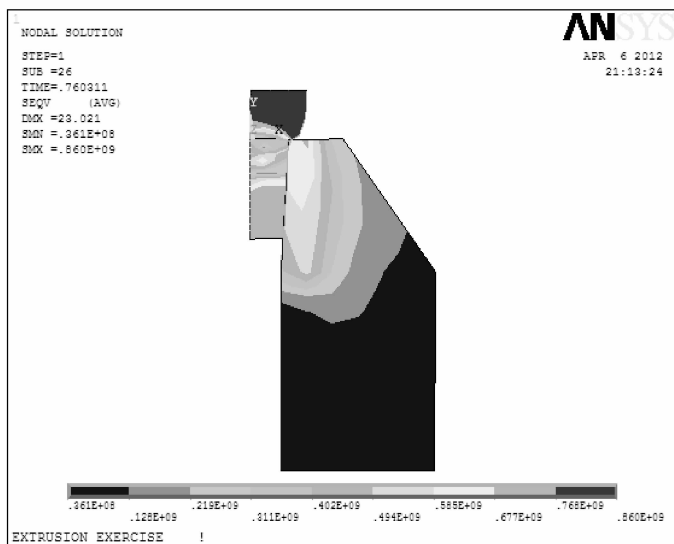


图 7-2 等效应力等值线图

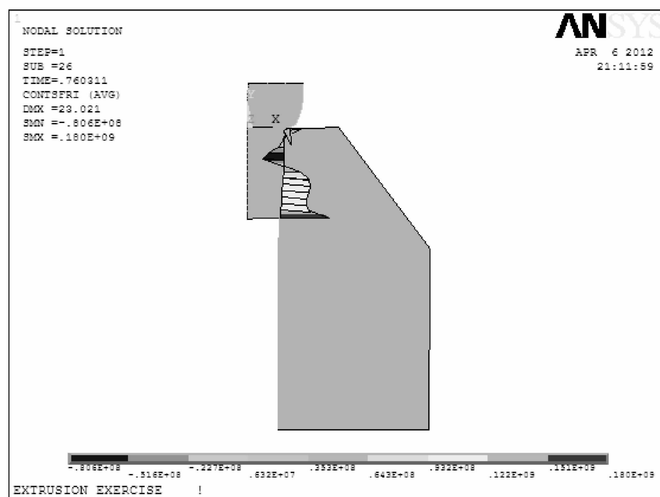


图 7-3 摩擦应力等值线图

7.2.2　实例 2—镁合金坯料镦粗过程有限元分析

镦粗是使毛坯高度减小，横断面积增大的锻造工序。镦粗过程材料受力示意图见图 7-4。热导率和比热容随材料的温度变化而变化见图 7-5。密度为 1.78e-6kg/m^3，热膨胀系数为 $26.8\times10^{-6}K^{-1}$，弹性模量为 4.5e7MPa，泊松比为 0.35。

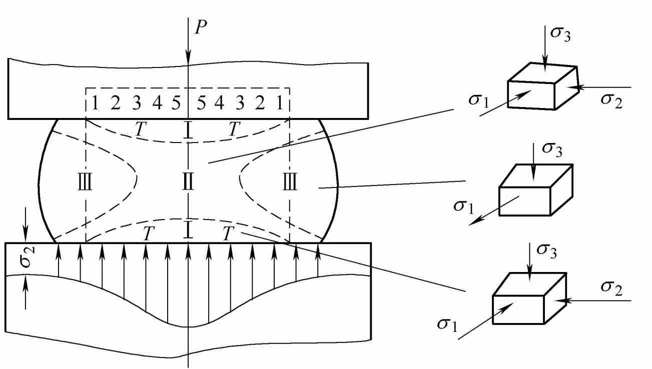


图 7-4　镁合金镦粗示意图

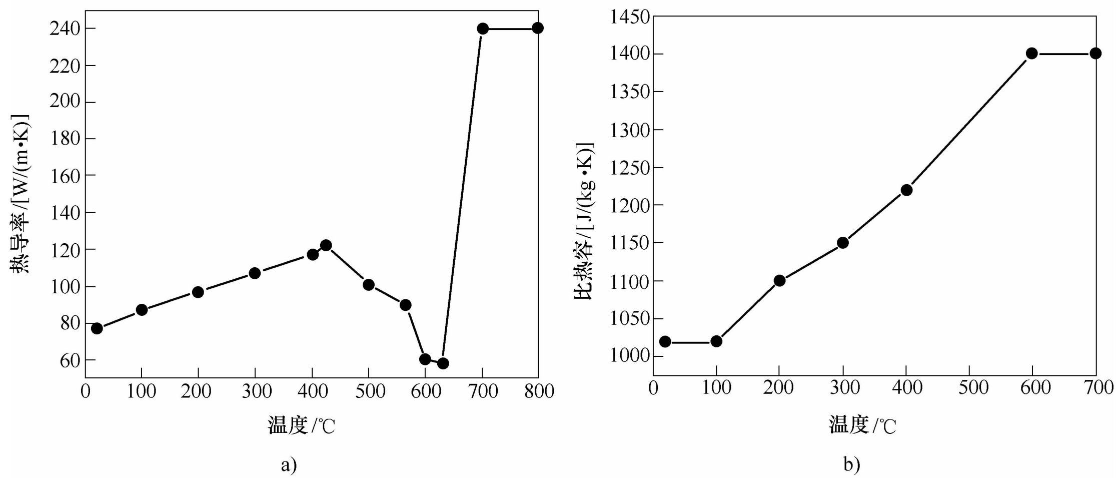


图 7-5　AZ31 镁合金物理性能曲线
a）热导率　b）比热容

命令流如下：

```
/clear
！第一步:进行温度场分析
/filname,ex7-2,0                ！定义分析文件名
/prep7                          ！进入前处理器
et,1,plane55                    ！选择热分析单元
keyopt,1,3,1                    ！设置为轴对称分析选项
mptemp,,,,,,,,                  ！镁合金材料性能参数
mptemp,1,20
mptemp,2,100
```

```
mptemp,3,200
mptemp,4,300
mptemp,5,400
mptemp,6,600
mptemp,7,700
mpdata,C,1,,2665.2                   ! 比热容
mpdata,C,1,,2665.2
mpdata,C,1,,2745.2
mpdata,C,1,,2795.2
mpdata,C,1,,2865.2
mpdata,C,1,,2045.2
mpdata,C,1,,2045.2
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,20
mptemp,2,100
mptemp,3,200
mptemp,4,300
mptemp,5,400
mptemp,6,425
mptemp,7,600
mptemp,8,630
mptemp,9,700
mpdata,KXX,1,,77                     ! 热导率
mpdata,KXX,1,,87
mpdata,KXX,1,,97
mpdata,KXX,1,,107
mpdata,KXX,1,,117
mpdata,KXX,1,,122
mpdata,KXX,1,,60
mpdata,KXX,1,,58
mpdata,KXX,1,,240
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,DENS,1,,1.78e-6               ! 密度
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
uimp,1,reft,,,200
mpdata,alpx,1,,2.68e-5               ! 热膨胀系数
mpde,ex,1
mpde,nuxy,1
mpdata,ex,1,,4.5e7
mpdata,nuxy,1,,0.35
mptemp,,,,,,,,                       ! 定义坯料的材料属性
```

```
mptemp,1,400
mptemp,2,850
mptemp,3,1000
mptemp,4,1100
mptemp,5,1150
mptemp,6,1200
mpdata,KXX,2,,0.05
mpdata,KXX,2,,0.0394
mpdata,KXX,2,,0.0324
mpdata,KXX,2,,0.0295
mpdata,KXX,2,,0.0295
mpdata,KXX,2,,0.0265
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,400
mptemp,2,850
mptemp,3,1000
mptemp,4,1100
mptemp,5,1150
mptemp,6,1200
mpdata,C,2,,400
mpdata,C,2,,607
mpdata,C,2,,770
mpdata,C,2,,636
mpdata,C,2,,636
mpdata,C,2,,636
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,DENS,2,,7.85e-6
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
uimp,2,reft,,,400
mpdata,alpx,2,,1e-5
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
uimp,2,reft,,,400
mpde,alpx,2
mpdata,alpx,2,,1e-005
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,ex,2,,21e4
mpdata,prxy,2,,0.3                    ! 定义上下砧材料属性
rectng,0,35,0,15,                     ! 建立下砧几何模型
rectng,0,20,15,65,                    ! 建立坯料几何模型
```

```
rectng,0,35,65,80,                  ! 建立上砧几何模型
esize,1,0,                          ! 定义单元划分尺寸
mshape,0,2d
mshkey,1                            ! 设置为映射单元划分类型
asel,s,,,1,3,2
aatt,2,1,1                          ! 赋予上下砧几何模型材料属性
asel,s,,,2
aatt,1,1,1                          ! 赋予坯料几何模型材料属性
asel,all
amesh,all                           ! 划分单元
/com, contact pair creation-start
cm,_nodecm,node
cm,_elemcm,elem
cm,_kpcm,kp
cm,_linecm,line
cm,_areacm,area
cm,_volucm,volu
/gsav,cwz,gsav,,temp
mp,mu,1,0.3
mat,1
r,3
real,3
et,2,169
et,3,172
keyopt,3,9,0
keyopt,3,10,2
r,3,
rmore,
rmore,,400
rmore,0
keyopt,3,1,1
lsel,s,,,3                          ! 产生目标面
cm,_target,line
type,2
nsll,s,1
esln,s,0
esurf
cmsel,s,_elemcm
lsel,s,,,5                          ! 产生接触面
cm,_contact,line
type,3
nsll,s,1
esln,s,0
```

```
esurf
allsel
esel,all
esel,s,type,,2
esel,a,type,,3
esel,r,real,,3
/psymb,esys,1
/pnum,type,1
/num,1
eplot
esel,all
esel,s,type,,2
esel,a,type,,3
esel,r,real,,3
cmsel,a,_nodecm
cmdel,_nodecm
cmsel,a,_elemcm
cmdel,_elemcm
cmsel,s,_kpcm
cmdel,_kpcm
cmsel,s,_linecm
cmdel,_linecm
cmsel,s,_areacm
cmdel,_areacm
cmsel,s,_volucm
cmdel,_volucm
/gres,cwz,gsav
cmdel,_target
cmdel,_contact
/com,contact pair creation-end              ! 建立坯料和下砧间的接触
/com,contact pair creation-start
cm,_nodecm,node
cm,_elemcm,elem
cm,_kpcm,kp
cm,_linecm,line
cm,_areacm,area
cm,_volucm,volu
/gsav,cwz,gsav,,temp
mp,mu,1,0.3
mat,1
r,4
real,4
et,4,169
```

```
et,5,172
keyopt,5,9,0
keyopt,5,10,2
r,4,
rmore,
rmore,,400
rmore,0
keyopt,5,1,1
lsel,s,,,9                    ! 形成目标面
cm,_target,line
type,4
nsll,s,1
esln,s,0
esurf
cmsel,s,_elemcm
lsel,s,,,7                    ! 形成接触面
cm,_contact,line
type,5
nsll,s,1
esln,s,0
esurf
allsel
esel,all
esel,s,type,,4
esel,a,type,,5
esel,r,real,,4
/psymb,esys,1
/pnum,type,1
/num,1
eplot
esel,all
esel,s,type,,4
esel,a,type,,5
esel,r,real,,4
cmsel,a,_nodecm
cmdel,_nodecm
cmsel,a,_elemcm
cmdel,_elemcm
cmsel,s,_kpcm
cmdel,_kpcm
cmsel,s,_linecm
cmdel,_linecm
cmsel,s,_areacm
```

```
cmdel,_areacm
cmsel,s,_volucm
cmdel,_volucm
/gres,cwz,gsav
cmdel,_target
cmdel,_contact
/com,contact pair creation-end          ! 建立坯料和上砧间的接触
esel,s,mat,,1
esel,r,type,,1
nsle
d,all,temp,400,,                        ! 定义坯料的初始温度
esel,s,mat,,2
esel,r,type,,1
nsle
d,all,temp,400,,                        ! 定义上下砧的初始温度
allsel,all
finish
/solu                                   ! 进入求解器
antype,trans                            ! 设置为瞬态分析类型
timint,off                              ! 关掉时间积分
kbc,0                                   ! 设置为斜坡加载方式
time,1e-3                               ! 定义求解时间
toffst,100                              ! 设置温度偏移量
solve                                   ! 求解
ddel,all                                ! 删除温度载荷
lsel,s,,,6
nsll,,1
sf,all,conv,3e-4,20                     ! 施加坯料外边缘对流换热载荷
allsel,all
timint,on                               ! 打开时间积分
time,5                                  ! 定义求解时间
kbc,1
autots,on
solve                                   ! 求解
finish
/post1                                  ! 进入通用后处理器
/dscale,1,1.0                           ! 设置显示比例
set,last                                ! 读取最后载荷步分析结果
/expand,18,axis,,,10                    ! 设置三维周期扩展选项
plnsol,temp,,0,                         ! 显示温度分布云图(见图 7-6)
! 第二步:进行结构场分析
finish
/filname,ex7-2-1,0                      ! 更改文件名
```

```
/prep7                                  ! 进入前处理器
eplot                                   ! 显示单元
lsclear,all                             ! 清除温度场载荷
etchg,tts                               ! 将温度场单元转化为结构场单元
…
                                        ! 更改接触单元分析选项
et,1,visco106                           ! 将单元类型 1 更改为 VISCO106 大变形分析单元
keyopt,1,3,1
keyopt,1,5,0
keyopt,1,6,0
keyopt,1,7,0                            ! 设置 VISCO106 单元分析选项
tref,400                                ! 定义参考温度
nsel,s,loc,y,0
d,all,uy,0                              ! 施加下砧底面 Y 向约束
nsel,s,loc,y,80
d,all,uy,-50                            ! 定义上砧下压量
nsel,s,loc,x,0
d,all,ux,0                              ! 施加对称约束
allsel,all
finish
/solu                                   ! 进入求解器
ldread,temp,,,1,,'ex7-2-1','rst',''     ! 读取温度场分析结果
antype,0                                ! 设置为稳态分析选项
nlgeom,1                                ! 设置为大变形分析
deltim,.01,.001,.2                      ! 定义时间子步
outres,erase
outres,all,all                          ! 设置输出选项
time,5                                  ! 定义求解时间
allsel,all
solve                                   ! 求解
/post1                                  ! 进入通用后处理器
set,last                                ! 读取最后子步分析结果
plnsol,s,eqv,0,1.0                      ! 显示等效应力分布云图
/expand,18,axis,,,10                    ! 设置三维周期扩展选项
plnsol,s,eqv,0,1.0                      ! 显示等效应力分布云图(见图 7-7)
/exit, nosav                            ! 退出 ANSYS
```

7.2.3 实例 3—坯料扭转塑性变形过程分析

有一等直径圆轴如图 7-8 所示，其圆截面直径 $D=50\text{mm}$，长度 $L=120\text{mm}$，作用在圆轴上的转矩 $M_n=1.5\times10^3\text{N}\cdot\text{m}$，求其位移和剪应力。

命令流如下：

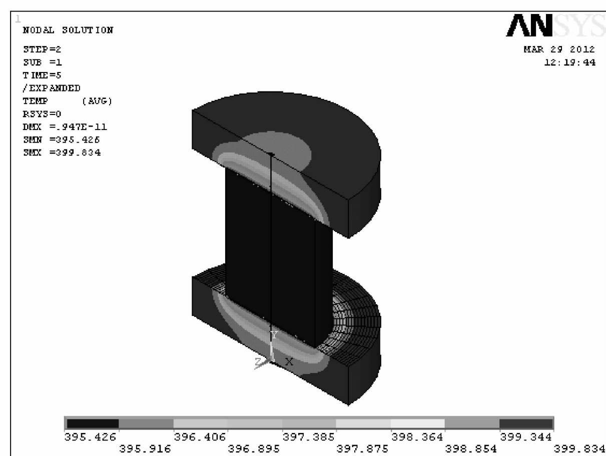


图 7-6　成形初期温度分布图

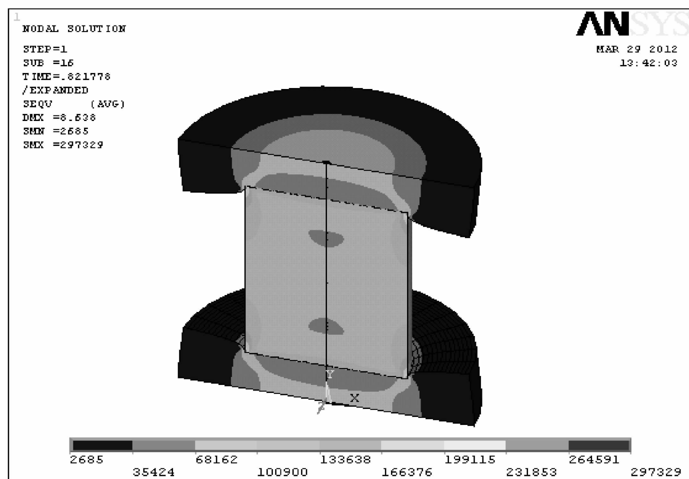


图 7-7　成形过程应力分布图

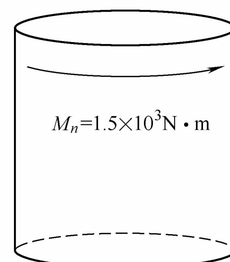


图 7-8　扭转塑性变形示意图

```
/clear
/filname,ex7 -3
/prep7
et,1,plane183              ! 设定单元类型
et,2,solid186
mp,ex,1,2.08e11            ! 定义材料参数
mp,prxy,1,0.3
rectng,0,0.025,0,0.12      ! 创建几何模型
lesize,1,,,5               ! 设定单元尺寸
lesize,2,,,8
mshape,0                   ! 设定单元划分方式
mshkey,1
amesh,1
```

```
extopt,esize,5                 ! 设定拉深单元类型
extopt,aclear,1
vrotat,1,,,,,,1,4,360          ! 旋转拉深
/view,1,1,1,1
wprot,0,-90                    ! 变换工作平面
cswpla,11,1,1,1                ! 创建局部坐标系
nsel,s,loc,x,0.025             ! 选择节点
nrotat,all                     ! 旋转节点坐标系
finish
/solu
d,all,ux                       ! 施加约束
nsel,r,loc,z,0.12
f,all,fy,1500                  ! 施加载荷
allsel,all
da,2,all                       ! 施加约束
da,6,all
da,10,all
da,14,all
solve                          ! 求解
save
finish
/post1
pldisp,1                       ! 查看变形结果
rsys,11
nsel,s,loc,z,0.045
nesl,r,loc,y,0
prnsol,u,y                     ! 查看位移分布
                               ! 查看应力分布(见图 7-9)
finish
```

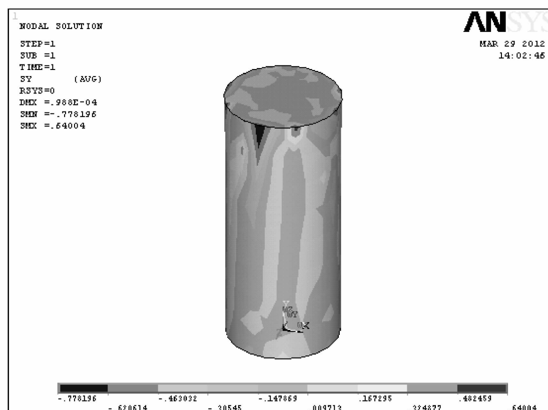


图 7-9　成形过程应力分布图

7.2.4　实例 4—坯料拔长过程模拟

拔长是使毛坯横断面积减小、长度增加的锻造工序，见图 7-10。上模截面为 10mm × 5mm，锻件为 5mm × 4mm，下模为 10mm × 5mm。本例采用 2-D 轴对称单元 plane162，采用 ASSC 自动单面接触。

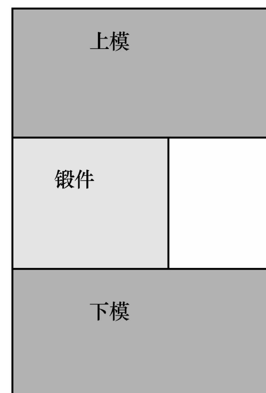


图 7-10　拔长过程示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname, ex7 -4
/prep7
et, 1, plane162
et, 2, plane162
et, 3, plane162
keyopt, 1, 3, 1
keyopt, 2, 3, 1
keyopt, 3, 3, 1
mp, DENS, 1, 2.7e -4
mp, nuxy, 1, .334
tb, bkin, 1
tbdat, 1, 5000
tbdat, 2, 20000
mp, ex, 2, 30e6
mp, DENS, 2, 2.7e -4
mp, nuxy, 2, .292
mp, ex, 3, 30e6
mp, DENS, 3, 2.7e -4
mp, nuxy, 3, .292
edmp, rigid, 2, 6, 7
edmp, rigid, 3, 7, 7
rectng, 0, 10, 10, 15
rectng, 0, 6, 5, 10
rectng, 0, 10, 0, 5
asel, s,,, 1
type, 2
mat, 2
esize,, 6
amesh, all
asel, s,,, 2
type, 1
mat, 1
esize,, 4
amesh, all
asel, s,,, 3
type, 3
```

```
mat, 3
esize,, 6
amesh, all
allsel
edcgen, assc,,, 0.1
edclist, all
edpart, create
finish
/solu
*dim, t, array, 2
*dim, d, array, 2
t(1) =0,1
d(1) =0, -1
edload,add,rbuy,,1,t,d
time,1
edrst,10
edhtime,10
edout,glstat
edout,matsum
edout,rcforc
edout,rbdout
solve
finish
/post1
set,last
plnsol,s,eqv                    ! 应力分布(见图7-11)
finish
```

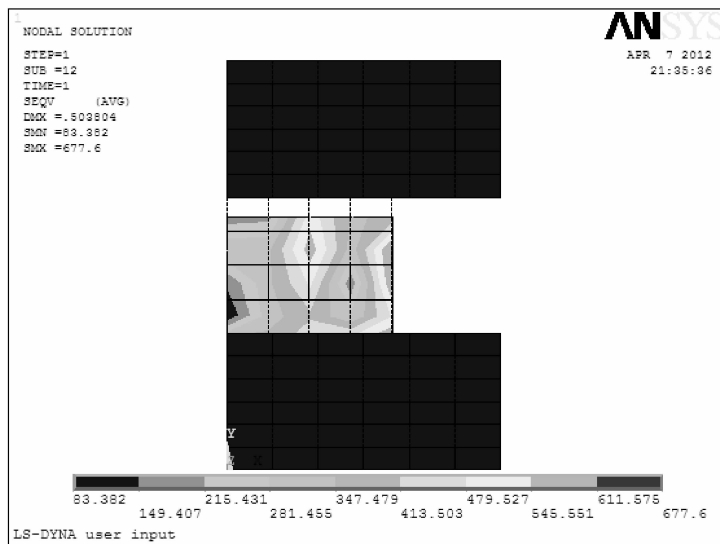


图 7-11　成形过程应力分布图

7.3　本章总结

本章主要介绍锻压工艺基本知识和计算机模拟理论，非线性接触分析的基本内容和过程、工程应用实例，通过对实例的具体分析求解，使读者熟悉锻压问题模拟分析的基本方法和步骤，并为读者提供典型锻压问题的求解思路。

7.4　练习题

1）锻压工艺的种类及其特点，模拟的基本理论。

2）基于 ANSYS 软件的非线性接触模拟的内容是什么？有哪些步骤？

3）反挤压塑性变形过程模拟，一镁合金圆柱体试样反挤压见图 7-12，试样几何参数、材料参数以及模具材料参数如下：模具材料弹性模量为 206000MPa；泊松比为 0.4；屈服极限为 235MPa；密度为 7.8e-6kg/m^3。试样弹性模量为 45000MPa；泊松比为 0.35；屈服极限为 150MPa；密度为 1.8e-6kg/m^3；摩擦系数为 0.25。材料尺寸为 $D=60$mm；$L=30$mm。

分析：该问题属于非线性接触问题，在分析中选择试样的 1/4 建立有限元分析模型，并选择相应的接触对单元进行求解。

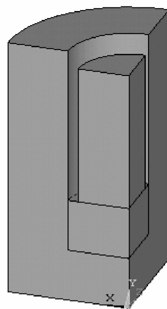


图 7-12　反挤压示意图

第8章　基于ANSYS软件的轧制成形数值模拟

8.1　轧制成形的基本理论

轧制是旋转的轧辊将材料带入辊缝之间并使之产生变形的过程。接近轧件头尾端的变形是非稳定变形，而在其他部分，沿轧件前进方向上条件没有急剧的变化，故为稳定状态。轧制生产中，材料的塑性变形规律、轧辊和轧件之间的摩擦现象、材料中的温度和微观组织的变化、轧制过程中的压下率、宽厚比等及其对轧件质量的影响，都是非常复杂的问题。影响生产效率和生产质量的原因很多，从现场和实验中得到的规律和理论很难覆盖所有方面，而且耗费巨大。采用数值模拟的方法进行数值实验是近年来理论研究中的趋势。将有限元方法应用于轧制过程的理论研究，不但可以节省实验费用，而且因其高速性和可靠性可以对轧制过程中不易进行实验研究的课题进行深入的探讨。平板轧制技术表面上看起来非常简单，但是实际生产时遇到的问题很多，并且有些至今尚未很好地解决。如轧制变形区内的三维应力应变分布规律、中厚板的平面形状规律、咬入和抛钢阶段的不稳定变形等。因此，采用有限元方法，特别是弹塑性有限元方法对轧制过程进行分析仍非常必要。在轧制过程的弹塑性有限元分析中，按所用的有限元计算方法可以分为两大类：迭代算法求解微分方程的隐式算法和差分积分方法求解微分方程的显式算法。本章将简述本实验室对平板轧制过程进行模拟的一些情况，着重介绍采用 ANSYS 和 ANSYS/LS-DYNA 进行平板轧制过程模拟的基本思路，并对采用显式和隐式算法中的一些差别进行比较。

8.2　ANSYS软件在轧制成形模拟中的应用实例

8.2.1　实例1—中厚板双辊轧制分析

中厚板外形扁平，可通过剪裁、弯曲、冲压及焊接等工艺制成各种制品和构件，被称为“万能钢材”。中厚钢板是国民经济发展所依赖的重要钢铁材料。发达国家中厚板的需求量占钢材总量的14% ~16%，我国目前为11% ~13.4%。随着国民经济的发展，对中厚板行业提出了更高的要求，因此有必要了解目前我国中厚板的生产现状及其与国外的差距。探讨中厚板轧制过程中出现的理论问题，进而充分采用新技术和新工艺，使我国中厚板生产向优质、多品种、低成本以及高效益方向发展，以适应国内外市场的需求和挑战。中厚板扎制的特点之一是坯料尺寸范围小而产品尺寸范围大，一般情况下都需要对其进行展宽轧制。典型的中厚板扎制过程一般分为成形扎制、展宽轧制和精轧三个阶段。目前国内多数中厚板厂家均采用单机架可逆轧制。利用有限元方法能够对轧制过程多道次进行模型分析。

已知：轧辊：$E_{roll}=2.1e11Pa$；$\sigma_{roll}=0.3$；$\rho_{roll}=7850kg/m^3$。

轧件：$H_0=70\text{mm}$；$H_1=70\text{mm}$；$E_{slab}=1.17\text{e}11\text{Pa}$；$\sigma_{slab}=0.36$；$\rho_{slab}=7850\text{kg/m}^3$；$\sigma_Y=8\text{e}7\text{Pa}$；$\sigma_{tan}=8\text{e}6\text{Pa}$。

初始条件 $V_o=2.88\text{m/s}$；$F_s=0.3$；$F_d=0.2$。

求解：分析中厚板在轧制过程中的变形情况。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex8 - 1                              ! 定义文件名
/title,profile bar rolling ansys              ! 设置标题
/prep7                                        ! 进入前处理器
et,1,solid164                                 ! 定义实体单元类型
mp,DENS,1,785000                              ! 定义轧件材料模型
mp,ex,1,1.17e+011
mp,nuxy,1,0.36
tbde,biso,1
tb,biso,1,,,,
tbdat,1,8e+007
tbdat,2,8e+006
edmp,rigi,2,7,7                               ! 定义轧辊材料模型
mp,DENS,2,785000
mp,ex,2,2.1e11
mp,nuxy,2,0.3
k,,-0.001,0.045,,                             ! 创建轧辊关键点
k,,0.02,0.045,,
k,,0.04,0.065,,
k,,0.069,0.065,,
k,,0.09,0.01,,
k,,0.11,0.01,,
lstr,1,2                                      ! 创建轧辊轮廓线
lstr,2,3
lstr,3,4
lstr,4,5
lstr,5,6
lfillt,1,2,0.03,,                             ! 创建倒角
lfillt,2,3,0.038,,
lfillt,3,4,0.008,,
lfillt,4,5,0.016,,
flst,2,9,4,orde,2                             ! 将轮廓线相加,便于划分网格
fitem,2,1
fitem,2,-9
lcomb,p51x,,0
lgen,2,1,,,,0.01,,,0                          ! 复制轮廓线
lstr,1,7                                      ! 连接端点
```

```
lstr,6,8
al,3,2,4,1                                              ! 创建轧辊截面
k,,,0.285,,                                             ! 创建中心对称点
k,,0.11,0.285,,
vrotat,1,,,,,,9,10 ,360,,                               ! 由面旋转生成体
block,,0.07,,0.07,-0.15,-0.65,                          ! 创建轧件
numcmp,kp                                               ! 压缩关键点
numcmp,line                                             ! 压缩线
mat,1                                                   ! 选择轧件材料类型
lesize,38,0.007,,,,,,,1                                 ! 自定义单元尺寸
lesize,39,0.007,,,,,,,1
lesize,41,0.005,,,,,,,1
mshape,0,3d                                             ! 定义划分单元方法
mshkey,1
vmesh,5                                                 ! 给轧件划分网格
mat,2                                                   ! 定义材料类型
lesize,1,,,15,,,,,1                                     ! 自定义单元尺寸
lesize,20,0.005*1.5,,,,,,,1
lesize,28,0.005*1.5,,,,,,,1
lesize,31,0.005*1.5,,,,,,,1
lesize,10,0.005*1.5,,,,,,,1
lesize,3,,,1,,,,,1
lesize,4,,,1,,,,,1
lesize,5,,,1,,,,,1
lesize,7,,,1,,,,,1
lesize,13,,,1,,,,,1
lesize,15,,,1,,,,,1
lesize,21,,,1,,,,,1
lesize,23,,,1,,,,,1
smrt,6                                                  ! 设置智能划分网格
vsweep,1                                                ! 划分轧辊网格
vsweep,2
vsweep,3
vsweep,4
edpart,create                                           ! 创建 part
edcgen,asts,1,2,0.3,0.2,0,0,0,,,,,0,10000000,0,0        ! 定义接触
vsel,s,,,5                                              ! 选取轧件
nslv,s,1                                                ! 选取轧件下的节点
cm,slab,node                                            ! 定义坯料
nsel,r,loc,y,0                                          ! 选择轧件高向对称面上的节点
d,all,uy,0                                              ! 进行约束
allsel,below,volu                                       ! 在轧件下进行编辑
nsel,r,loc,x,0                                          ! 选取宽向对称面上的节点
```

```
d,all ,ux,0                                  ! 进行约束
allsel,all                                   ! 选取所有
edve,velo,slab,0,0,2.88,                     ! 定义轧件初始速度
*dim,time,array,2,1,1                        ! 定义时间变量
*dim,velocity,array,2,1,1                    ! 定义速度变量
*set,time(2,1,1), 0.25                       ! 赋值时间变量
*set, velocity(2,1,1), -2.62                 ! 赋值速度变量
edload, add, rbrx, 0, 2, time, velocity      ! 加载轧辊速度
finish
/solu                                        ! 进入求解模块
edenergy, 1, 1, 1, 1                         ! 设置能量模型
time, 0.25,                                  ! 定义结束时间
edrst, 50,                                   ! 定义输出 rst 结果步数
save                                         ! 保存整个模型
solve                                        ! 求解
/dscale, 1, 1.0                              ! 设置显示比例
finish                                       ! 进入 post1
/post1
set, last                                    ! 设置观察步数
pldisp, 1                                    ! 显示变形情况
plnsol, s, eqv, 0, 1.0                       ! 显示应力分布情况
/expand, 4, polar, half,, 90                 ! 显示完整模型，应力显示(见图 8-1)
finish
/exit,nosav                                  ! 退出 ANSYS
```

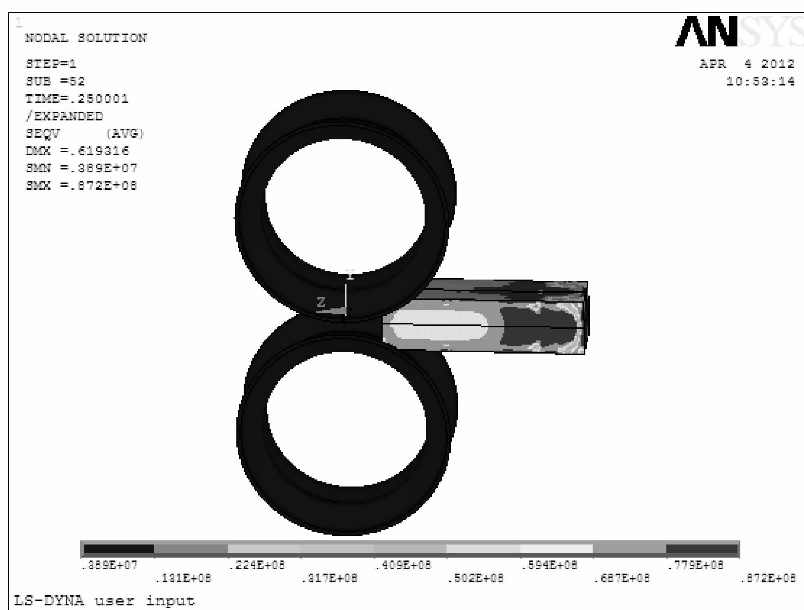


图 8-1　轧制过程应力分布

8.2.2　实例 2—钢板卷制成圆筒

利用 ANSYS 非线性分析功能模块分析钢板卷制成圆筒的过程(见图 8-2)。

轧辊：$E_{roll}=2e11\text{MPa}$；$\sigma_{roll}=0.3$；$\rho_{roll}=7800\text{kg/m}^3$。轧件：$H_0=70\text{mm}$；$H_1=70\text{mm}$
$E_{slab}=2.2e11\text{MPa}$；$\sigma_{slab}=0.3$；$\rho_{slab}=7850\text{kg/m}^3$；$\sigma_Y=240e6\text{Pa}$；$\sigma_{tan}=2e8\text{Pa}$。

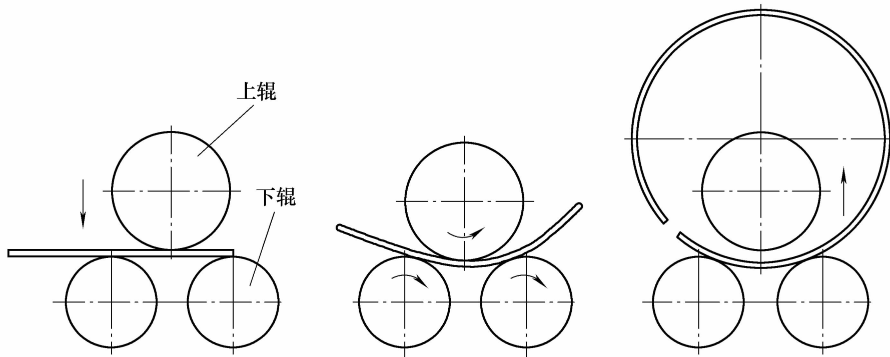


图 8-2　钢板卷制成圆筒过程示意图

命令流如下：

```
/clear                                  ! 清除数据库,新建文件
/filname,ex8-2                          ! 指定工作名
/config,nres,2000                       ! 设置最大子步数
/prep7                                  ! 进入前处理器
/pnum,volu,on                           ! 打开体号
et,1,shell43                            ! 选择单元类型,壳单元用于划分上下辊
et,2,solid186                           ! 实体单元用于划分钢板
mp,ex,1,2e11                            ! 定义材料模型 1 的弹性模量
mp,DENS,1,7800                          ! 定义材料模型 1 的密度
mp,nuxy,1,0.3                           ! 定义材料模型 1 的泊松比
mp,ex,2,2e11                            ! 定义材料模型 2 的弹性模量
mp,DENS,2,7800                          ! 定义材料模型 2 的密度
mp,nuxy,2,0.3                           ! 定义材料模型 2 的泊松比
tb,bkin,2,1
tbtemp,0
tbdata,,240e6,2e8                       ! 定义材料模型 2 的屈服强度、剪模量
r,1,0.02                                ! 定义实常数 1,壳单元的厚度
cylind,0.38/2,0,0.3,2.3,0,360           ! 创建上辊(圆柱体)
cylind,0.38/4,0,0.3,0,0,360
cylind,0.38/4,0,2.6,2.3,0,360
vglue,all                               ! 粘接
vsel,none
wpoff,0.54/2,-0.4                       ! 偏移工作平面原点到右下辊中心
cylind,0.3/2,0,0.3,2.3,0,360            ! 创建右下辊,圆柱体
```

```
cylind,0.3/4,0,0.3,0,0,360
cylind,0.3/4,0,2.6,2.3,0,360
vglue,all
vsel,none
wpoff,-0.54                                          ! 偏移工作平面原点到左下辊中心
cylind,0.3/2,0,0.3,2.3,0,360                         ! 创建左下辊,圆柱体
cylind,0.3/4,0,0.3,0,0,360
cylind,0.3/4,0,2.6,2.3,0,360
vglue,all
alls                                                 ! 选择所有实体
vdele,all                                            ! 删除体,但保留面
hptcreate,area,5,,coord                              ! 在上辊端面中心处创建硬点
hptcreate,area,10,,coord,0,0,2.6
hptcreate,area,34,,coord,-0.54/2,-0.4,2.6            ! 在左下辊端面中心处创建硬点
hptcreate,area,29,,coord,-0.54/2,-0.4,0
hptcreate,area,22,,coord,0.54/2,-0.4,2.6             ! 在右下辊端面中心处创建硬点
hptcreate,area,17,,coord,0.54/2,-0.4,0
mat,1                                                ! 为上下辊划分单元指定属性,材料模型
type,1                                               ! 单元类型
real,1                                               ! 实常数
esize,0.05                                           ! 指定单元边长度
smrtsize,8                                           ! 指定智能尺寸级别
mshape,1                                             ! 指定单元形状为三角形
amesh,all                                            ! 对所有面划分单元
block,0.7,-1.0,0.3/2+.02,0.3/2+.02+0.03,0.5,2.1      ! 创建钢板(块)
lesize,96,,,1                                        ! 指定线 96(钢板厚度)被划分为 1 段
mat,2                                                ! 为钢板划分单元指定属性
type,2
mshkey,1                                             ! 映射网格
mshape,0                                             ! 指定单元形状为六面体
esize,0.05                                           ! 指定单元边长度
vmesh,all                                            ! 对块划分网格
et,4,targe170                                        ! 指定单元类型,用于创建接触对
et,5,conta174
keyopt,5,12,1                                        ! 设置单元 5 接触表面无滑动
r,10,,,0.1                                           ! 定义实常数,kfn=0.1
r,11,,,0.1
r,12,,,0.1
asel,s,,,40                                          ! 在钢板上表面和上辊表面建立接触对
nsla,s,1
nsel,u,loc,z,0.8,1.8
mat,3
real,10
```

```
type,4
esurf
alls
asel,s,,,3,4,1
nsla,s,1
nsel,u,loc,z,0.9,1.7
nsel,u,loc,z,0.3,0.4
nsel,u,loc,z,2.2,2.3
mat,3
real,10
type,5
esurf
alls
asel,s,,,39                                    ! 在钢板下表面和左下辊表面建立接触对
nsla,s,1
nsel,u,loc,z,0.8,1.8
mat,4
real,11
type,4
esurf
alls
asel,s,,,27,28,1
nsla,s,1
nsel,u,loc,z,0.9,1.7
nsel,u,loc,z,0.3,0.4
nsel,u,loc,z,2.2,2.3
mat,4
real,11
type,5
esurf
alls
asel,s,,,39                                    ! 在钢板下表面和右下辊表面建立接触对
nsla,s,1
nsel,u,loc,z,0.8,1.8
mat,4
real,12
type,4
esurf
alls
asel,s,,,15,16,1
nsla,s,1
nsel,u,loc,z,0.9,1.7
nsel,u,loc,z,0.3,0.4
```

```
nsel,u,loc,z,2.2,2.3
mat,4
real,12
type,5
esurf
alls
finish
! 首先模拟下辊不动,上辊下降
/solu                                      ! 进入求解器
d,all,uz                                   ! 在所有节点上施加约束
d,all,rotx
d,all,roty
nsel,s,loc,x                               ! 选择上辊轴线上节点
nsel,r,loc,y
d,all,uy,-0.08                             ! 施加约束,上辊下降 0.08m
d,all,ux
d,all,uz
alls
csys,4                                     ! 激活工作平面坐标系
asel,s,loc,y,-2,0.3/2+0.01                 ! 选择下辊上所有面
nsla,s,1                                   ! 选择下辊上所有节点
d,all,all                                  ! 约束所有自由度
alls
antype,trans                               ! 瞬态分析
neqit,100                                  ! 指定最大迭代次数
lnsrch,on                                  ! 打开线性搜索
nlgeom,on                                  ! 打开大变形选项
time,1                                     ! 指定载荷步时间
autot,on                                   ! 打开自动载荷步长
nsubst,30,80,20                            ! 指定子步数目
kbc,0                                      ! 斜坡载荷
outres,all,all                             ! 输出所有子步所有项目的结果
solve                                      ! 求解
csys,4                                     ! 以下模拟下辊转动,驱动钢板前进
asel,s,loc,y,-2,0.3/2+0.01                 ! 选择下辊上所有面
nsla,s,1                                   ! 选择下辊上所有节点
ddele,all,all                              ! 删除上一载荷步施加在下辊上的所有约束
alls
d,all,uz                                   ! 在所有节点上施加约束
d,all,rotx
d,all,roty
nsel,s,loc,x,0                             ! 选择左下辊轴线上所有节点
nsel,r,loc,y
```

```
d,all,rotz, -3.1415926                        ! 转动半周
d,all,ux                                      ! 约束移动
d,all,uy
alls
wpoff,0.54                                    ! 偏移工作平面
nsel,s,loc,x,0                                ! 选择右下辊轴线上所有节点
nsel,r,loc,y
d,all,ux                                      ! 约束移动
d,all,uy
d,all,rotz, -3.1415926                        ! 转动半周
time,2
alls
kbc,0
nsubst,200,1000,100
solve                                         ! 求解
acel,0,9.8                                    ! 施加重力加速度
csys,0                                        ! 激活全局直角坐标系
nsel,s,loc,x                                  ! 选择上辊轴线上所有节点
nsel,r,loc,y
d,all,uy, -0.06                               ! 上辊向上移动,卸载
d,all,ux
d,all,uz
d,all,rotx
d,all,roty
alls
kbc,0
nsubst,20,300,10
time,2.1
solve
finish
/post1                                        ! 查看结果
set,last                                      ! 读取最后载荷子步计算结果
plns,u,sum
antime,50,0.5,,1,2,0,2.1                      ! 用动画查看卷制圆筒过程中的变形情况(见图 8-3)
finish
```

8.2.3 实例 3—大辊固定小辊运动的接触辊压

如图 8-4 所示，大辊固定做旋转运动，小辊绕大辊运动。板料的弹性模量为 1.16e6MPa，泊松比为 0.33。

命令流如下：

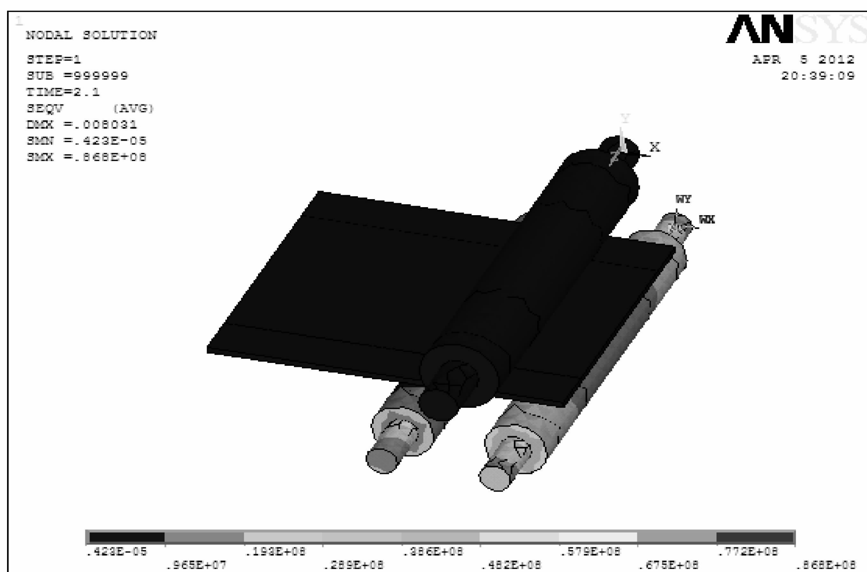


图 8-3　卷筒成形过程应力分布

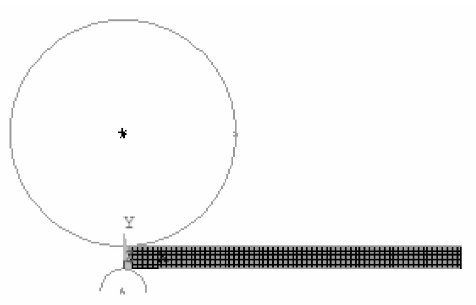


图 8-4　大辊固定小辊运动的接触辊压示意图

```
/clear
thick =0. 1                    ！ 厚度
radius =0. 5                   ！ 辊的半径
length =1. 5                   ！ 长度
/filname,ex8 -3                ！ 指定工作名
/prep7
et,1,182,1,,2                  ！ 选择单元
et,2,169
et,3,171
r,2,0,0,1,0. 1
rmore,0. 1,0. 01
r,3,0,0,1,0. 1
rmore,0. 1,0. 01
mp,ex,1,16e6                   ！ 材料性能
mp,nuxy,1,0. 33
mp,mu,1,0. 3
```

```
tb,miso,1,0,9
tbpt,,0.000625,10000
tbpt,,0.0025,15000
tbpt,,0.005,21000
tbpt,,0.01,29000
tbpt,,0.015,32600
tbpt,,0.02,34700
tbpt,,0.04,36250
tbpt,,0.10,39000
tbpt,,0.20,40250
k,1
k,2,length
kgen,2,1,2,1,,thick,,2
a,1,2,4,3
type,1
mat,1
lesize,1,,,70                  ! 划分网格
lesize,2,,,5
lesize,3,,,70
lesize,4,,,5
amesh,all
nummrg,all
asel,none
lsel,none
wpave,,thick + radius
cswpla,11,1
k,20,radius,180                ! 关键点
k,21,radius,-90
k,22,radius,0
k,23,0,0
k,24,radius,90
l,20,21                        ! 线
l,21,22
l,22,24
l,24,20
type,2
real,2
lmesh,all
alls
csys,0
nsel,s,loc,y,thick
type,3
esurf
```

```
nsel,s,loc,y,0
real,3
esurf
asel,none
lsel,none
wpave,,-thick
cswpla,12,1
k,30
k,31,thick,0
k,32,thick,90
k,33,thick,180
l,31,32
l,32,33
type,2
lmesh,all
kmesh,23                        ! 划分网格
ksel,s,kp,,23
nslk,s
*get,n_load,node,,num,max
csys,0
asel,all                        ! 边界条件
esla,s
nsle,s
nsel,r,loc,x,0
d,all,ux,0
nsel,r,loc,y,thick
d,all,uy,0
alls
finish
/solu
antype,static
nlgeom,on
solc,on
nsubst,20,500,10
outres,all,all
d,n_load,,2,,,,rotz,,,,,
solve
/post1
set,last                        ! 设置观察步数
pldisp,1                        ! 显示变形情况
plnsol,s,eqv,0,1.0              ! 显示应力分布情况(见图 8-5)
finish
```

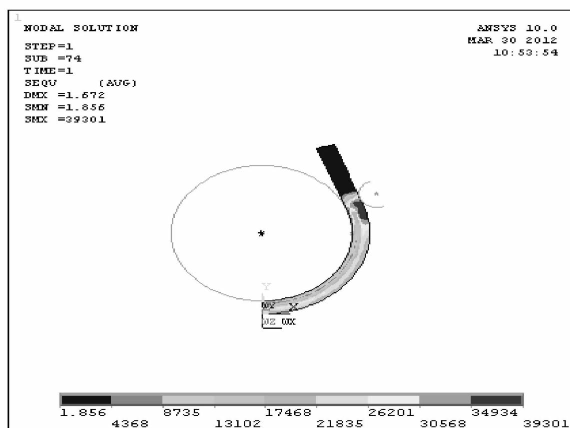


图 8-5　应力分布

8.2.4　实例 4—轧制过程轧辊变形的仿真

采用 2-D 单元 plane162 模拟轧辊轧制过程的变形见图 8-6。上下辊直径为 450mm，轧件纵截面尺寸为 620mm × 280mm。轧辊：E_{roll} = 30e6 Pa；σ_{roll} = 0. 292；ρ_{roll} = 2. 7e-4kg/m^3。轧件：E_{slab} = 10e6Pa；σ_{slab} = 0. 334；ρ_{slab} = 2. 7e-4kg/m^3；σ_Y = 8e7Pa；σ_{tan} = 8e6Pa。初始条件 V_o = 2m/s。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex8 -4
/prep7
cyl4,0,520,450                ! 上辊
rectng, -700, -200, -80,80    ! 轧件
cyl4,0, -520,450              ! 下辊
cyl4,0,520,450
rectng, -700, -200, -80,80
cyl4,0, -520,450
et,1,plane162                 ! 采用 ASSC 自动单面接触
et,2,plane162
et,3,plane162
keyopt,1,3,2
keyopt,2,3,2
keyopt,3,3,2
mp,ex,1,30e6                  ! 材料性能
mp,DENS,1,2.7e -4
mp,nuxy,1,0.292
mp,DENS,2,2.7e -4
mp,ex,2,10e6
mp,nuxy,2,.334
tb,bkin,2
```

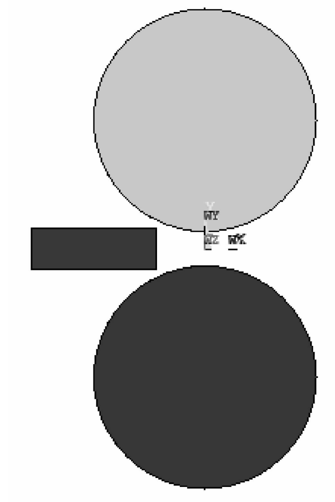


图 8-6　平面轧制示意图

```
tbdat,1,5000
tbdat,2,20000
mp,ex,3,30e6
mp,DENS,3,2.7e-4
mp,nuxy,3,.292
edmp,rigid,1,7,4
edmp,rigid,3,7,4
mshape,0,2d
mshkey,2
asel,s,,,1
type,1
mat,1
esize,,15                         ! 划分网格
amesh,all
asel,s,,,2
type,2
mat,2
esize,10
amesh,all
asel,s,,,3
type,3
mat,3
esize,,15
amesh,all
allsel
edcgen,ass2d,,,0.2,0.1
edclist,all
edpart,create
finish
/solu                             ! 求解
EDPV,velo,2,3000
*dim,vtime,array,2
*dim,vuprotate,array,2
*dim,vdownrotate,array,2
vtime(1)=0,4
vuprotate(1)=-2000,-2000
vdownrotate(1)=2000,2000
WPOFF,,520                        ! 将坐标原点移到上辊中心
edload,add,rboz,,1,vtime,vuprotate
CSYS,0                            ! 复原
WPAVE,0,0,0
CSYS,0
WPOFF,,-520                       ! 将坐标原点移到下辊中心
```

```
edload,add,rboz,,3,vtime,vdownrotate
CSYS,0                          ! 复原
WPAVE,0,0,0
CSYS,0
time,2
edrst,100
edhtime,100
edout,glstat
edout,matsum
edout,rcforc
edout,rbdout
solve                           ! 求解
/post1                          ! 后处理
set,1,25
plnsol,s,y
set,1,100
presol,s,y
/pnum,elem,1
ANDATA,0.5,,1,0,0,1,0,1
finish
/post1
set,1,25
plnsol,s,y                      ! 变形图(见图 8-7)
set,1,100
presol,s,y
/pnum,elem,1
ANDATA,0.5,,1,0,0,1,0,1
```

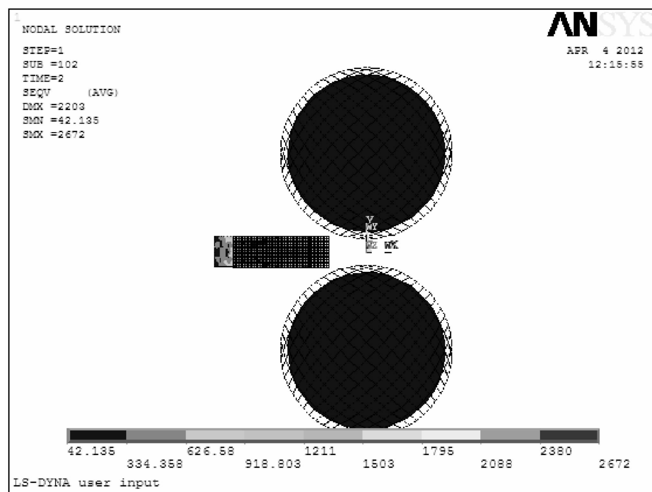


图 8-7 轧辊变形图

8.3　本章总结

通过本章的学习，可以了解关于轧制技术的基本理论，还可以学会使用 ANSYS 软件对轧制过程进行分析求解，并熟悉相应的操作步骤及相关命令。

8.4　练习题

1）连续轧制过程（见图 8-8）的模拟。第一道轧制的轧辊半径 $r_1=0.10\text{m}$；第二道次轧制的轧辊半径 $r_2=0.09\text{m}$；轧件长度 $L=0.5\text{m}$，第一个辊子的工作长度 $w_1=0.05\text{m}$；第二个工作辊的工作长度 $w_2=0.06\text{m}$；轧件宽度 $w=0.04\text{m}$；第一个轧辊和第二个轧辊之间的距离 $D=0.22\text{m}$；轧件原始厚度 $H_1=0.03\text{m}$；第一道次轧制后轧件的厚度 $H_2=0.025\text{m}$；第二道次轧制后轧件的厚度 $H_3=0.02\text{m}$；工作辊旋转速度 $r_v=600\text{m/s}$；前张力 $T_1=1000\text{N}$；后张力 $T_0=0$；定义轧辊的转速，以线速度表示 $r_v=6.28\text{m/s}$。

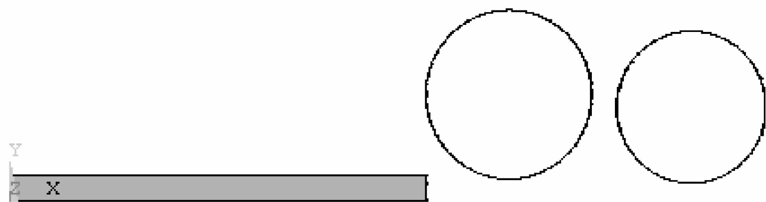


图 8-8　连续轧制示意图

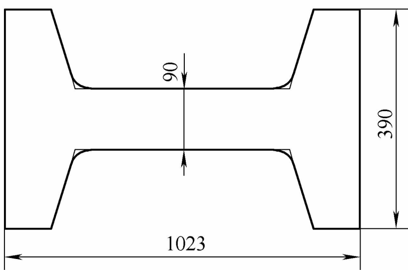


图 8-9　H 型截面尺寸

2）H 型钢轧制过程的分析。HN900 ×300 规格的产品采用近终形连铸异型坯，坯料为低碳钢，其断面尺寸如图 8-9 所示。该产品的开坯轧制采用异型孔平轧。材料性能参数见表 8-1。

表 8-1　基本材料参数

	密度/(kg/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	材 料 模 型
轧件	7800	11.2e5	0.133	109	双线性等向强化材料
轧辊	刚性辊				
摩擦系数	0.35（静摩擦）				

第 9 章　基于 ANSYS 软件的焊接过程数值模拟

9.1　焊接过程模拟的基本理论及 ANSYS 软件模拟基础

焊接是一个牵涉到电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程。焊接现象包括焊接时的电磁、传热过程、金属的熔化和凝固、冷却时的相变、焊接应力与变形等。要得到一个高质量的焊接结构必须控制这些因素。一旦各种焊接现象能够实现计算机模拟，我们就可以通过计算机系统来确定焊接各种结构和材料时的最佳设计、最佳工艺方法和焊接参数。

焊接过程是一个热力耦合的过程，通常采用弹塑性有限元法对其进行分析，包括温度场分析和应力场分析。有限元模型是真实系统理想化的数学抽象。建立有限元模型，包括确定单元类型、材料属性、几何模型以及划分网格都是温度场分析和应力场变形分析中最关键的一环。由于焊接是一个局部快速加热到高温，并随后快速冷却的过程。而随着热源的移动，整个焊件的温度随时间和空间急剧变化，材料的物理性能参数也随温度剧烈变化，同时还存在熔化和相变时的潜热现象。因此，焊接温度场的分析属于典型的非线性瞬态热传导问题。因为焊接温度场分布十分不均匀，在焊接过程中和焊后将产生相当大的焊接应力和变形。焊接应力和变形的计算中既有大应变、大变形等几何非线性问题，又有弹塑性变形等材料非线性问题。对均匀、各向同性的连续介质，且其特征值与温度无关时，在能量守恒的基础上，可得到热传导微分方程式为

$$\frac{\rho c\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\ \frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\ \frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\ \frac{\partial T}{\partial z}\right)+Q \tag{9-1}$$

式中，T 为温度；λ 为材料的热导率；t 为过程进行的时间；c 为材料的比热容；ρ 为材料的密度；Q 为单位体积输出或消耗的热能。

焊接过程属于瞬态传热过程，在这个过程中系统的温度、热流率、热边界条件以及系统内能随时间都有明显变化。根据能量守恒原理，其瞬态热平衡方程可表示为

$$\boldsymbol{C}\,\dot{\boldsymbol{T}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{T}=\boldsymbol{Q} \tag{9-2}$$

式中，$\boldsymbol{K}$ 为传导矩阵，包含热导率、表面传热系数及辐射率和形状系数；$\boldsymbol{C}$ 为比热容矩阵，考虑系统内能的增加；$\boldsymbol{T}$ 为节点温度向量；$\dot{\boldsymbol{T}}$ 为温度对时间的导数，$\boldsymbol{Q}$ 为节点热流率向量，包含热生成。在焊接过程中材料必然会有相变产生，随着相变而发生的热量转换（潜热的放出与吸收），为了准确计算焊接温度场，必须考虑相变潜热。ANSYS 热分析最强大的功能之一就是可以分析相变问题，ANSYS 通过定义材料的焓随温度变化来考虑熔融潜热，焓的单位是 J/m^3，是密度与比热容的乘积对温度的积分，其数学定义为

$$H=\int_{T_0}^{T}\rho c\,\mathrm{d}T \tag{9-3}$$

在热物理性能参数定义时，确定随温度变化的密度和比热容后，ANSYS 会自动算出焓。焊

接温度场求解过程中，将每一个载荷步划分为若干个时间步，在焊接和冷却开始以及相变发生的时候，时间步长要取得比较小，一般为 0.1s 左右，打开线性搜索选项，关闭自动时间步长，通过 deltim 命令设定时间步长，冷却到一定的时候，可以用较大的时间步长，打开自动时间步长，这样可以保证得到一个良好的焊接瞬态温度场。将计算得到的各节点温度保存在热分析结果文件中，以便作为应力场分析的体载荷。

在厚板焊接过程温度场的三维有限元模拟中，x、y、z 三个方向的热传导、对流都要考虑，冷却和升温的速度都相当高，是个高度非线形的过程，在求解过程一定要做一些非线性特殊处理。

热源模型是否选取适当，对瞬态温度场的计算精度，特别是在靠近热源的地方，有很大的影响。在电弧焊接时，通常采用高斯分布的热源模型，此时的热流分布为

$$q(r)=q_m\exp\left(-3\frac{r^2}{\bar{r}^2}\right) \tag{9-4}$$

式中，r 是离开热源中心的距离；$\bar{r}$ 是电弧有效加热半径；q_m 是最大比热流。对移动热源（非高速），有：

$$q_m=\frac{3}{\pi\bar{r}^2}q \tag{9-5}$$

其中

$$q=\eta IU \tag{9-6}$$

式中，q 为热源瞬时给焊件的热能；η 为焊接热效率；U 为电弧电压；I 为焊接电流。由于高斯分布函数没有考虑电弧的穿透作用，为了克服这个缺点，A. Goldak 提出了双椭球热源模型。这种模型将焊接熔池的前半部分作为一个 1/4 椭球，后半部分作为另一个 1/4 椭球。设前半部分椭球能量分数为 f_1，后半部分椭球能量分数为 f_2，且 $f_1+f_2=2$。

高斯、双椭球两种热源模型将焊接热流直接施加在整个焊件有限元模型上，不能模拟焊缝金属熔化和填充，无法模拟实际焊接过程，而生死单元能够克服这个缺点。生死单元技术就是采用生死单元模拟焊缝填充的方法来模拟焊接热输入过程。通过试验测量，将全部焊接热 Q 均匀分布在焊缝上，假设所有焊缝单元在计算前是不激活的。在开始计算前，将焊缝中所有单元“杀死”。在计算过程中，按顺序将被“杀死”的单元“激活”，模拟焊缝金属的填充。同时，给激活的单元施加生热率（$HGEN$），热载荷的作用时间等于实际焊接时间。

$$HGEN=Q/(A_{\text{weld}}\times v\times \mathrm{d}t) \tag{9-7}$$

式中，$HGEN$ 为每个载荷步施加的生热率；A_{weld} 为焊缝的横截面积；v 为焊接速度；$\mathrm{d}t$ 为每个载荷步的时间步长。

焊接温度场的准确计算是焊接冶金分析、焊接应力和变形分析以及焊接质量控制的前提。由于焊接过程中，随着热源的移动，整个焊件的温度均随时间和空间变化；材料的热物理性能参数随温度变化，以及焊接过程中存在熔化潜热和相变。因此，焊接温度场的问题是典型的非线性瞬态热传导问题。

9.2　ANSYS 软件在焊接工艺模拟中的应用实例

9.2.1　实例 1—T 型接头手工电弧焊接过程的模拟

由于实际焊接过程的复杂性，熔化和模拟过程基于以下假设条件：工件初始温度为室温

(20℃)；忽略焊接熔池中化学反应的影响；将热传导扩大为熔池内部的热对流；假设材料均匀各向同性；忽略填充材料和木材的差异；考虑潜热的影响是采用相同的比热容。问题分析：对 1 个焊接件的两条焊缝的凝固过程的温度场进行分析，几何模型如图 9-1 所示(单位:mm)。焊条及两块钢板的材料为钢，其物理性能见表 9-1。热导率 kxx = 0.5e − 3W/(m · K)；比热容 c = 0.2J/(kg · K)；密度 ρ = 0.3833kg/m^3；初始条件：焊接件的温度为 70℃，焊缝温度为 1649℃；对流边界条件：表面传热系数为 0.00005W/(m^2 · K)，空气温度为 70℃。求 2000s 后整个焊接件的温度分布。

表 9-1 焓变

材料参数(温度)/℃	0	1451	1510	1579	1649
焓/(J/m^3)	0	128.1	163.8	174.2	184.6

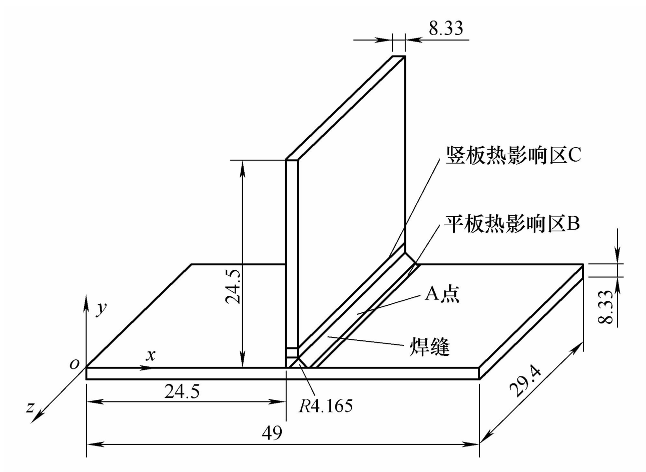


图 9-1 T 形梁

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex9 -1                              ! 定义隐式热分析文件名
/prep7                                       ! 进入前处理器
et,1,solid70                                 ! 选择 8 节点实体热分析单元
mp,KXX,1,.5e -3                              ! 热导率
mp,C,1,.2                                    ! 焓
mp,DENS,1,.2833                              ! 密度
mptemp,1,0,1451,1510,1579,1649
mpdata,enth,1,1,0,128.1,163.8,174.2,184.6    ! 定义右焊缝材料热物理性能
mp,KXX,2,.5e -3
mp,C,2,.2
mp,DENS,2,.2833
mp,KXX,3,0.5e -3                             ! 定义两块钢板的热物理性能
mp,C,3,.2
mp,DENS,3,.3833
```

```
mptemp,1,0,1451,1510,1579,1649
mpdata,ENTH,3,1,0,128.1,163.8,174.2,184.6          ! 定义左焊缝材料热物理性能
block,-0.17,0.17,0,0.34,0,1.2                      ! 建模
block,0.17,0.34,0,0.34,0,1.2
block,0.34,1,0,0.34,0,1.2
block,-0.17,0.17,0.34,0.51,0,1.2
block,-0.17,0.17,0.51,1.34,0,1.2
wpave,0.17,0.34,0
cylind,0.17,0,0,1.2,0,90
wpave,0,0,0
csys,0
flst,3,3,6,orde,3
fitem,3,2
fitem,3,-3
fitem,3,6
vsymm,x,p51x,,,,0,0                                ! 建立焊接件的几何模型
vglue,all                                          ! 粘接各体
vsel,s,,,10
vatt,1,1,1                                         ! 赋予右焊缝的材料属性
vsel,s,,,1
vsel,a,,,12,17,1
vatt,2,1,1                                         ! 赋予两块钢板的材料属性
vsel,s,,,11
vatt,3,1,1                                         ! 赋予左焊缝的材料属性
allsel,all
esize,0.05                                         ! 定义单元划分尺寸
vsweep,all                                         ! 划分单元
esel,s,mat,,3
toffst,460                                         ! 定义温度偏移量
ekill,all                                          ! 杀死左焊缝单元
allsel,all
/solu
antype,trans                                       ! 定义瞬态分析类型
timint,off                                         ! 关闭时间积分
esel,s,mat,,1
nsle                                               ! 选择右焊缝节点
d,all,temp,1649                                    ! 施加右焊缝初始温度载荷
nsel,inve                                          ! 选择其他节点
d,all,temp,20                                      ! 施加初始温度载荷
time,1                                             ! 定义求解时间
kbc,0                                              ! 设置为斜坡载荷
allsel,all
solve                                              ! 求解
```

```
ddele,all,temp                          ! 删除温度载荷
timint,on                               ! 打开时间积分
tintp,,,,1                              ! 定义瞬态积分参数
time,100                                ! 定义求解时间
deltime,1,.5,10                         ! 定义时间子步
autots,on                               ! 打开自动时间开关
kbc,1                                   ! 设置为阶跃载荷
outres,erase
outres,all,all                          ! 设置结果输出
asel,s,ext
asel,u,loc,y,0
sfa,all,,conv,5e-5,20                   ! 施加对流换热载荷
allsel,all
solve                                   ! 求解
time,1500                               ! 定义求解时间
deltime,50,10,100                       ! 定义时间子步
autots,on                               ! 打开自动时间开关
solve                                   ! 求解
ealive,all                              ! 激活左侧焊缝单元
allsel,all
esel,s,mat,,3
nsle                                    ! 选择左焊缝节点
d,all,temp,1649                         ! 施加左焊缝初始温度载荷
time,1001                               ! 定义求解时间
deltime,1,1,1                           ! 定义时间子步
allsel,all
solve                                   ! 求解
ddele,all,temp                          ! 删除温度载荷
time,1100                               ! 定义求解时间
deltime,1,.5,10                         ! 定义时间子步
solve                                   ! 求解
time,2000                               ! 定义求解时间
deltime,100,10,200                      ! 定义时间子步
solve                                   ! 求解
/post1                                  ! 进入通用后处理器
set,,,,,,,last                          ! 读取最后一步分析结果
plnsol, temp,, 0                        ! 显示焊接件的温度分布(见图9-2)
finish
```

9.2.2 实例2—镁合金激光脉冲焊接过程模拟

以激光束为代表的高能束流焊接方法，日益得到广泛应用。由于激光焊接具有高能量密度、可聚焦、深穿透、高效率、高精度、适应性强等优点而受到各发达国家的重视，并已应

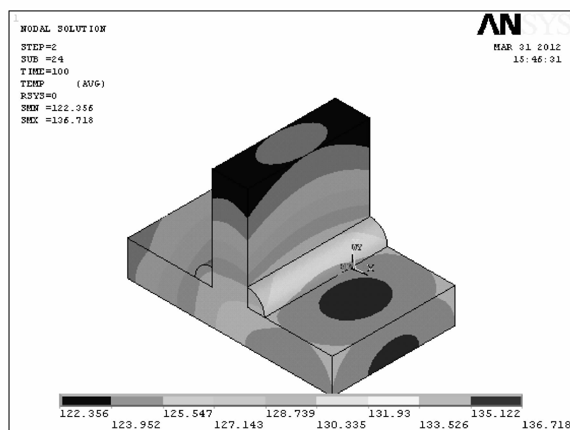


图 9-2　100s 时焊接件的温度分布

用于航空航天、汽车制造、电子轻工等领域。图 9-3 所示为镁合金薄板激光焊接示意图。焊缝长度 0.050m，焊接宽度为 0.1m，激光最小半径 0.0003m，激光焊接速度 0.3m/min。

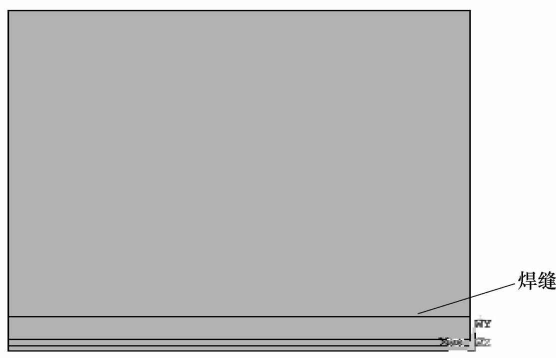


图 9-3　薄板激光焊接示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex9 -2,1
/title,laser weldding
/units,si
/prep7
length =0.050                    ! 焊缝长度
width =0.050                     ! 焊接宽度的一半
rlaser =0.0003                   ! 激光最小半径
vlaser =0.3/60                   ! 激光焊接速度
lsize =0.00025                   ! 划分最小单元尺寸
tt =length/vlaser                ! 总的焊接时间
f =30                            ! 激光脉冲频率
tinc =1/f                        ! 激光作用周期
```

```
l_zone=0.001                            !网格细化分宽度
qmax=35.38e8                            !激光最大输出能量
et,1,shell57                            !采用 shell57 单元
r,1,0.0005                              !厚度
mptemp,,,,,,,,                          !镁合金材料性能参数
mptemp,1,20
mptemp,2,100
mptemp,3,200
mptemp,4,300
mptemp,5,400
mptemp,6,600
mptemp,7,700
mpdata,c,1,,2665.2                      !比热容
mpdata,c,1,,2665.2
mpdata,c,1,,2745.2
mpdata,c,1,,2795.2
mpdata,c,1,,2865.2
mpdata,c,1,,2045.2
mpdata,c,1,,2045.2
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,20
mptemp,2,100
mptemp,3,200
mptemp,4,300
mptemp,5,400
mptemp,6,425
mptemp,7,600
mptemp,8,630
mptemp,9,700
mpdata,KXX,1,,77                        !热导率
mpdata,KXX,1,,87
mpdata,KXX,1,,97
mpdata,KXX,1,,107
mpdata,KXX,1,,117
mpdata,KXX,1,,122
mpdata,KXX,1,,60
mpdata,KXX,1,,58
mpdata,KXX,1,,240
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,DENS,1,,1.78e-6                  !密度
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
```

```
uimp,1,reft,,,200
mpdata,alpx,1,,2.68e-005                 ! 热膨胀系数
mpde,ex,1
mpde,nuxy,1
mpdata,ex,1,,4.5e+007
mpdata,nuxy,1,,0.35
uimp,2,reft,,,400
s_dis=0.0005
rectng,s_dis,0.050+s_dis,0,0.0008        ! 建立模型
rectng,s_dis,0.050+s_dis,0.0008,0.0018
rectng,s_dis,0.050+s_dis,0.0018,0.005
rectng,s_dis,0.050+s_dis,0.005,0.050
aglue,all
numcmp,all
lesize,12,,,20                            ! 面 4 划分网格
lesize,13,,,20
lesize,7,,,20
mshkey,1
mshape,0,2d
amesh,4
lesize,10,,,2
lesize,11,,,2
mshkey,1
mshape,0,2d
amesh,3
lrefine,5,,,1,1,off
lesize,8,,,2
lesize,9,,,2
mshkey,1
mshape,0,2d
amesh,2
lrefine,3,,,1,1,off
lesize,2,,,4,
lesize,4,,,4,
mshkey,1
mshape,0,2d
amesh,1
allsel,all
numcmp,all
allsel,all
/replot
finish
/solu
```

```
antype,trans
trnopt,full
tunif,293
nlgeom,off
nropt,full
kk =3
n _ once = tt/tinc
max _ time = n _ once +1
max _ x = (length +2 * s _ dis)/lsize +1
max _ y =2 * l _ zone/lsize +1
h _ max _ y =l _ zone/lsize +1
    sfa, 2,, conv, 400, 293                    ! 定义载荷并求解
    sfa, 3,, conv, 250, 293
    sfa, 4,, conv, 50, 293
*dim, flux2, table, max _ x, max _ y, max _ time, x, y, time
    *do, k, 1, max _ time, 1
          *do, i, 1, max _ x, 1
          flux2(i,0,k) = (i -1) * lsize
          *enddo
          *do,j,1,max _ y,1
          flux2(0,j,k) = -(h _ max _ y -j) * lsize
    *enddo
        *do,i,1,max _ x,1
        *do,j,1,max _ y,1
              xcenter = (k -1) * vlaser/f
              ycenter =0
              xcoord = (i -1) * lsize
              ycoord = -(h _ max _ y -j) * lsize
distance = sqrt((xcoord - xcenter) * *2 + (ycoord - ycenter) * *2)
              *if,distance,le,rlaser,then
              flux2(i,j,k) =qmax/exp(kk * (distance * *2)/(rlaser * *2))
              *else
              flux2(i,j,k) =0
              *endif
        *enddo
        *enddo
    flux2(0,0,k) = (k -1) * tinc
    outres,basic,all
    kbc,1
    tsres,erase
    timint,on
    lnsrch,on
    tm1 =0.005 + (k -1) * tinc
```

```
    time,tm1
    sfa,1,,hflux,%flux2%
    autots,-1
    nsubst,4
    /gst,on
    /rep,fast
    /psf,hflux,,1                    ! 表面上热流加载用带颜色填充曲面表示
    /replot
    solve
    sfadele,1,,hflux
    tm2 = k * tinc
    time,tm2
    sfa,1,,conv,400,293
    autots,-1
    nsubst,4
    /gst,on
    solve
    sfadele,1,,conv
    save
*enddo
save
! 冷却阶段
*do,k,1,30,1
time,tt + 5 * k                      ! 载荷步结束时间
nsubst,25
kbc,1
solve
save
*enddo
outres,all,all
finish
/config,nres,10000
/filname,stress3,1
/title,laser weldding
/units,si
/prep7
et,1,solid45                         ! 把热单元转化成结构单元
r,1,0.0005
mptemp,,,,,,,,                       ! 设置结构分析的材料属性
mptemp,1,293
mptemp,2,373
mptemp,3,473
mptemp,4,513
```

```
mptemp,5,573
mptemp,6,673
mptemp,7,773
mptemp,8,873
mptemp,9,973
mptemp,10,1073
mptemp,11,1173
mptemp,12,1273
mptemp,13,1373
mptemp,14,1423
mptemp,15,1473
mptemp,16,1596
mptemp,17,1673
mptemp,18,1873
mptemp,19,2073
mptemp,20,2273
mptemp,21,2473
mptemp,22,2673
mptemp,23,2873
mptemp,24,3073
mptemp,25,3273
mpdata,alpx,1,,0.184e-5
mpdata,alpx,1,,1.17e-5
mpdata,alpx,1,,1.21e-5
mpdata,alpx,1,,1.28e-5
mpdata,alpx,1,,1.31e-5
mpdata,alpx,1,,1.35e-5
mpdata,alpx,1,,1.40e-5
mpdata,alpx,1,,1.47e-5
mpdata,alpx,1,,1.55e-5
mpdata,alpx,1,,1.60e-5
mpdata,alpx,1,,1.65e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
```

```
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mpdata,alpx,1,,1.8e-5
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,293
mptemp,2,373
mptemp,3,473
mptemp,4,573
mptemp,5,673
mptemp,6,773
mptemp,7,873
mptemp,8,973
mptemp,9,1073
mptemp,10,1173
mptemp,11,1273
mptemp,12,1373
mptemp,13,1473
mptemp,14,1596
mptemp,15,1673
mptemp,16,1873
mptemp,17,2073
mptemp,18,2273
mptemp,19,2473
mptemp,20,2673
mptemp,21,2873
mptemp,22,3073
mptemp,23,3273
mpdata,ex,1,,2.05e11
mpdata,ex,1,,2.03e11
mpdata,ex,1,,1.98e11
mpdata,ex,1,,1.92e11
mpdata,ex,1,,1.86e11
mpdata,ex,1,,1.80e11
mpdata,ex,1,,1.78e11
mpdata,ex,1,,1.67e11
mpdata,ex,1,,1.59e11
mpdata,ex,1,,1.50e11
mpdata,ex,1,,1.41e11
mpdata,ex,1,,1.2e11
mpdata,ex,1,,0.8e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
```

```
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,ex,1,,0.08e11
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mpdata,prxy,1,,0.33
mptemp,,,,,,,,
tb,biso,1,6,2,
tbtemp,298
tbdata,,354e6,5.89e9,,,,
tbtemp,873
tbdata,,212e6,1.7e9,,,,
tbtemp,1073
tbdata,,199e6,1.4e9,,,,
tbtemp,1473
tbdata,,100e6,1e8,,,,
tbtemp,1596
tbdata,,50e6,1e7,,,,
tbtemp,2173
```

```
tbdata,,5e6,1e7,,,,
save
finish
/solu
antype,trans
trnopt,full                         ! 指定为完全瞬态分析
nropt,full,,on                      ! 完全牛顿—拉夫逊法,自适应下降
nlgeom,1                            ! 大变形
autots,on                           ! 激活时间步自动阶跃
timint,on,struct                    ! 打开结构瞬态分析
tintp,0.005,,,1,0.5,0.2
kbc,0
cnvtol,f,,0.005,2,1.0e-6
cnvtol,u,,0.005,2,1.0e-6
outres,erase
outres,nsol,last
nsel,s,loc,y,0.015,0.05
d,all,all,0
allsel,all
nsel,s,loc,y,0
dsym,symm,y,,
allsel,all
*set,ii,1
*do,t,1e-6,1,tinc/2
tm1=tinc*(ii-1)/2+1e-6
time,tm1
ldread,temp,,,tm1,,thermal3,rth
nsubst,20
solve
*set,ii,ii+1
*enddo
*set,aa,1
*do,t,1,30.5,tinc/2
tm2=tinc*(aa-1)/2+1
time,tm2
ldread,temp,,,tm2,,ex9-2,rth
nsubst,6
solve
*set,aa,aa+1
*enddo
*set,k,1
*do,t,30.51,55.51,0.1
tm3=(k-1)*0.1+30.51
```

```
time,tm3
ldread,temp,,,tm3,, ex9 -2,rth
nsubst,6
solve
 *set,k,k+1
 *enddo
nsel,s,loc,y,0.03
d,all,ux,0
d,all,uz,0
allsel,all
nsel,s,loc,y,0
dsym,symm,y,,
allsel,all
 *set,bb,1
 *do,t,55.52,57.52,0.02
tm4 =(bb-1)*0.02+55.52
time,tm4
ldread,temp,,,tm4,, ex9 -2,rth
nsubst,30
solve
 *set,bb,bb+1
 *enddo
 *set,jj,1
 *do,t,57.53,180,2
tm5 =(jj-1)*2+57.53
time,tm5
ldread,temp,,,tm5,,ex9 -2 ,rth
nsubst,6
solve
 *set,jj,jj+1
 *enddo
save
/post1                                  ! 进入通用后处理器
set,,, ,,, ,5                           ! 读取第 5 步的分析结果
plnsol, temp,, 0                        ! 显示焊接件的温度分布(见图 9-4)
finish
```

9.2.3 实例 3—某钢平板表面堆焊过程三维温度场模拟

堆焊是在工件的表面或边缘进行熔敷一层耐磨、耐蚀、耐热等性能金属层的焊接工艺。某钢的热导率 λ、比热容 c 和密度 ρ 等随温度的变化值见表 9-2。焊接电流为 160A，焊接电压为 23V，焊接速度为 0.00185m/s。

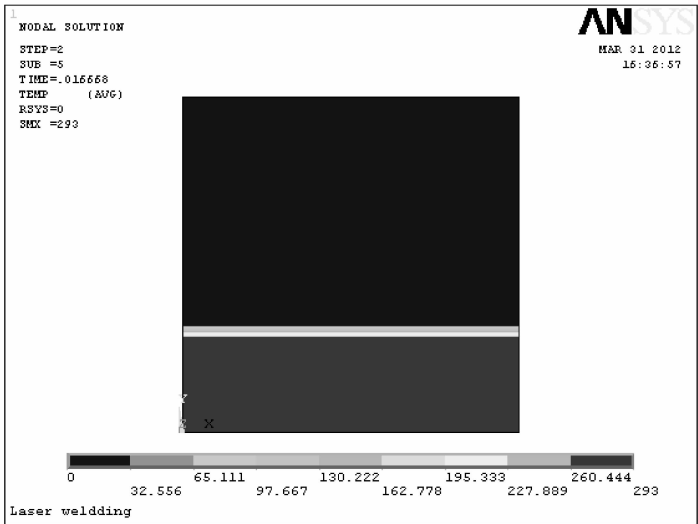


图 9-4　焊接件的温度分布

表 9-2　钢有关物理性能参数

温度 T/℃	0	400	600	800	1000	1500
热导率 λ/[W/(mm · K)]	18.9	28.35	31.08	32.76	31.5	28.2
密度 ρ/(kg/m^3)	7800	7550	7550	7550	7550	7550
比热容 c/[J/(kg · K)]	580	756	840	882	756	797
熵 s/(J/K)	9.66	59.43	84.32	109.2	180.6	359

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex9 -3
/title,surfacing welding temperatiure field simulation
/units,si
/prep7
et,1,solid70
keyopt,1,2,1
et,2,surf152
r,2
keyopt,2,4,1
keyopt,2,5,0
keyopt,2,8,3
mptemp,1,0,400,600,800,1000,1500
mpdata,KXX,1,1,18.9,28.35,31.08,32.76,31.5,28.2
mpdata,C,1,1,580,756,840,882,756,797
mpdata,HF,1,1,9.66,59.43,84.32,109.2,180.6,359
mpdata,DENS,1,1,7550,7550,7550,7550,7550,7550
```

```
pi =3. 1415926
i =160                                    ! 焊接电流
u =23                                     ! 焊接电压
efficient =0. 78                          ! 焊接热效率
r =0. 0045                                ! 有效加热半径
qm =3 * i * u * efficient/(pi * r * * 2)  ! 最大热流高斯密度
kk =0. 85                                 ! 能量集中系数
qmax = qm * kk
ly =0. 12
lx =0. 4
lz =0. 012
lsize =0. 01                              ! 单元网格长度
v =0. 00185                               ! 焊接速度
tm = lx/v                                 ! 焊接总时间
tinc = lsize/v                            ! 单步时间长度
max _ time =1 + tm/tinc
max _ x =1 + lx/lsize
max _ y =1 + ly/lsize
/view, 1, 1, 1, 1
block, 0, lx, 0, ly, 0, lz
save
esize, lsize
mshkey, 1
vatt, 1, 1, 1
vmesh, all
type, 2
asel, s,,, 1, 6
asel, u,,, 3
amesh, all
/pnum, line, off
/pnum, defa
eplot
finish
*dim, flux2, table, max _ x, max _ y, max _ time, x, y, time
*do, k, 1, max _ time, 1
  *do, i, 1, max _ x, 1
  flux2(i,0,k) = (i -1) * lsize
  *enddo
*do,j,1,max _ y,1
  flux2(0,j,k) = (j -1) * lsize
  *enddo
  *do,i,1,max _ x,1
    *do,j,1,max _ y,1
```

```
xcenter = v * (k - 1) * tinc
ycenter = 0
distance = sqrt(((i - 1) * lsize-xcenter) * * 2 + ((j - 1) * lsize-ycenter) * * 2)
 * if,distance,le,r,then flux2(i,j,k) = qmax * exp( - 3 * kk * distance * * 2/(r * * 2))
! 高斯移动热源公式
        * else
            flux2(i,j,k) = 0
        * endif
        * enddo
    * enddo
flux2(0,0,k) = (k - 1) * tinc
 * enddo
/solu
antype,trans
tunif,15
kbc,1
timint,on
autots,off
esel,s,type,,2                              ! 选择表面效应单元
nsle,s
sf,all,conv, - 1                            ! 施加对流边界条件
allsel
 * do,t,1e - 6,tm,tinc
time,t
autots,0
deltim,,,,1
kbc,0
outres,all,all
tsres,erase
sf,all,hflux,% flux2%
solve
 * enddo
finish
/post1
set,last                                    ! 读取最终求解结果
plnsol, temp,, 0                            ! 绘制温度场云图(见图 9-5)
finish
```

9.2.4　实例 4—板管焊接过程三维相变过程模拟

某管材的热导率为 5e-3W/(m·K)，比热容为 2J/(kg·K)，密度为 0.2833kg/m^3；某板材和管材的材料一样。焊料热导率为 0.5e-3W/(m·K)，密度为 0.2833kg/m^3，热容为 2J/(kg·K)。模拟管板焊接(见图 9-6)过程的温度场。

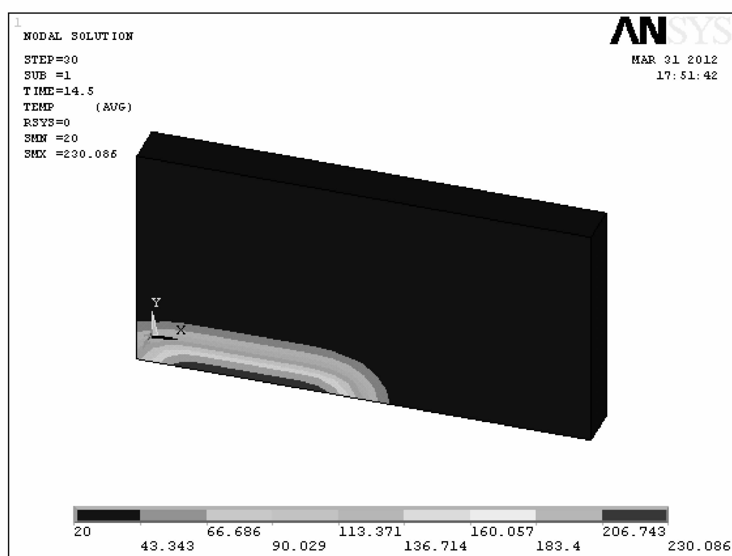


图 9-5 焊接 14.5s 时节点的温度

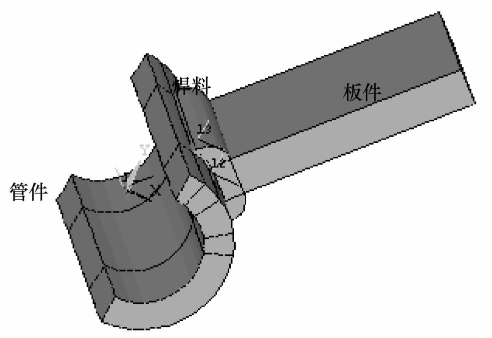


图 9-6 管板焊接示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex9 -4
/prep7
et,1,solid70                              ! 热分析单元
mp,KXX,1,.5e -3                           ! 热导率
mp,C,1,.2
mp,DENS,1,.2833
mptemp,1,0,1451,1510,1579,1649            ! 焓
mpdata,ENTH,1,1,0,128.1,163.8,174.2,184.6
mp,KXX,2,.5e -3                           ! 热导率
mp,C,2,.2
mp,DENS,2,.2833
mp,KXX,3,0.5e -3
mp,C,3,.2
```

```
mp,DENS,3,.2833
w=1.20
tl=.34
tweld=.2                                ! 焊件厚度
tpivot=tl                               ! 支撑板厚度
tphalf=tpivot/2
width=w                                 ! 支撑板宽度
whalf=width/2
lcyl=2.5                                ! 管的长度
lhalf=lcyl/2
rid=.50                                 ! 管的内径
rod=.75                                 ! 管的外径
*afun,deg
ang1=50-asin(tphalf/rod)-2*asin(tweld/(2*rod))
ang2=50-asin(tphalf/rod)
ang3=50+asin(tphalf/rod)
ang4=50+asin(tphalf/rod)+2*asin(tweld/(2*rod))
wpst,-1 ,1 ,-10 ,10 ,.003 ,3
/pnum,volu,1
/view,1,-.2,.2,1
cylind,rid,rod,-lhalf,-whalf,-90,ang1
cylind,rid,rod,-whalf,+whalf,-90,ang1
cylind,rid,rod,+whalf,+lhalf,-90,ang1
cylind,rid,rod,-lhalf,-whalf,ang1,ang2
cylind,rid,rod,-whalf,+whalf,ang1,ang2
cylind,rid,rod,+whalf,+lhalf,ang1,ang2
cylind,rid,rod,-lhalf,-whalf,ang2,ang3
cylind,rid,rod,-whalf,+whalf,ang2,ang3
cylind,rid,rod,+whalf,+lhalf,ang2,ang3
cylind,rid,rod,-lhalf,-whalf,ang3,ang4
cylind,rid,rod,-whalf,+whalf,ang3,ang4
cylind,rid,rod,+whalf,+lhalf,ang3,ang4
cylind,rid,rod,-lhalf,-whalf,ang4,90
cylind,rid,rod,-whalf,+whalf,ang4,90
cylind,rid,rod,+whalf,+lhalf,ang4,90
/type,1,4
wprot,50
block,.6,rod*cos(asin(tphalf/rod))+tweld,-tphalf,tphalf,-whalf,whalf
cswpla,11,0
ksel,s,loc,x,.75*cos(asin(tphalf/rod))
ksel,r,loc,y,-tphalf
ksel,r,loc,z,lhalf
*get,knum1,kp,,num,max
```

```
ksel,s,loc,x,.75 * cos(asin(tphalf/rod))
ksel,r,loc,y,tphalf
ksel,r,loc,z,lhalf
*get,knum2,kp,,num,max
ksel,all
wpro,-50
csys,0
local,12,0,kx(knum1),ky(knum1)
csys,0
local,13,0,kx(knum2),ky(knum2)
wpcsys,-1,12
vsel,u,,,1,16
cylind,,tweld,-whalf,whalf,(ang1+ang2)/2-90,70
/dist,1,.6
/focus,1,.47,.59
wpcsys,-1,13
cylind,,tweld,-whalf,whalf,35,90+(ang3+ang4)/2
vsel,all
bopt,keep,yes,
bopt,version,rv52
vsel,s,,,5,17,12
vsbv,17,5
vsel,a,,,16,19,3
vsbv,19,16
vsel,a,,,11,18,7
vsbv,18,11
vsel,a,,,16,21,5
vsbv,21,16
vsel,all
wpstyle,default
/focus,,.5,.5
/dist,1,.6
cylin,.6,sqrt((rod+.01)**2+tphalf**2),-2,+2,10,90
bopt,keep,no
vsel,s,,,20,22,2
vsel,a,,,23
vsel,all
vovlap,20,22,23
vdele,16,21,1,1
vdele,28,,,1
/type,1,4
csys,0
wpcsys,-1
```

```
wprot,50
numstr,volu,29
block,rod+.01,rod*cos(asin(tphalf/rod))+tweld,-tphalf,tphalf,-whalf,whalf
numstr,volu,30
block,rod*cos(asin(tphalf/rod))+tweld,3,-tphalf,tphalf,-whalf,whalf
nummrg,kp
vsel,s,,,24,26,2
esize,.1
vmesh,all
mat,3
vsel,s,,,25,27,2
vmesh,all
allsel,all
vsel,s,,,24,27,1
vsel,a,,,30
vsel,inve
esize,.1
mat,2
vmesh,all
esize,.2
lsel,s,,,198,199
lesize,all,,,8,5,1
lsel,s,,,196,201,5
lesize,all,,,8,.2,1
allsel,all
vmesh,30
numcmp,all
wpstyle,,,,,,,,0
esel,s,mat,,3
ekill,all
allsel,all
save,mesh,db
finish
/solu*
antype,trans
timint,off                          ！初始温度
esel,s,mat,,1                       ！焊右边
nsle
d,all,temp,1649                     ！焊接温度为 3000K
nsel,inve
d,all,temp,20                       ！基体温度为 70℃
time,1
kbc,0
```

```
nsubst,2,2,2
outres,basic,2
allsel,all
solve
save,therm,db
outres,nsol,1
ddele,all,temp
timint,on
tintp,,,,1
time,100                                    ！相变
deltime,1,.5,10
autots,on
asel,s,ext
asel,u,loc,x,0
sfa,all,,conv,5e-5,20
allsel,all
solve
time,1000                                   ！凝固
deltime,50,10,500
autots,on
solve
finish
/prep7
ealive,all
allsel,all
finish
/solu
antype,trans,rest
vsel,s,,,17
vsel,a,,,19
nslv,,1
d,all,temp,1649
time,1001
nsubst,2,2,2
allsel,all
solve
antype,trans,rest
ddele,all,temp
time,1100
deltime,1,.5,10
solve
time,2000
deltime,100,10,200
```

```
solve
finish
/post1
set,last                                  ! 读取最终求解结果
prrsol,temp                               ! 绘制温度场等值线圈(见图 9-7)
```

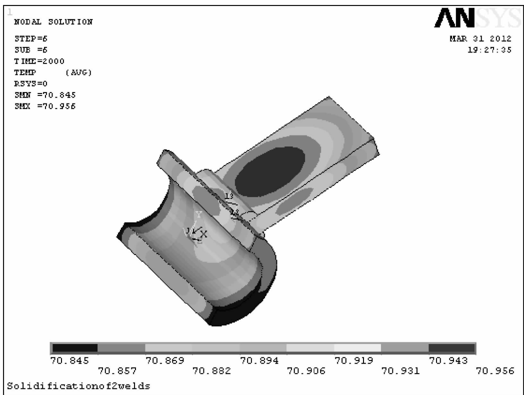


图 9-7　2000s 时的温度场分布

9.2.5　实例 5—三维焊缝热应力分析

某钢焊接过程的焊缝热应力分析，选用厚度为 6mm 的 9Ni 钢进行数值模拟，焊接热源作为内部热源。分析采用的是两平板开 Y 型口三道焊缝进行焊接，采用如下焊接参数：焊接电压 $U_1=36V$；焊接电流为 50A，焊接速度 $V=10mm/s$；焊接有效系数为 0.7；电弧有效加热半径 $R=1mm$。材料的热物理性能主要包括密度、比热容、弹性模量和屈服强度见表 9-3。在数值模拟计算中，热物理性能采用了经验数值。

表 9-3　钢的材料性能参数

温度 T/℃	比热容 c/[J/(kg·K)]	密度 ρ/(kg/m^3)	弹性模量 E/N·mm^2	屈服强度 Re_L/MPa
0	440	7859	210000	702
300	504	7770	196000	660
600	957	7650	145000	635
1000	1360	7600	30000	550
1300	2700	6750	2000	100
2000	2000	6750	2000	15

根据对称性，采用板的 1/2 进行数值模拟，在对称面上不考虑散热，其余各截面均需考虑散热作用。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex9 -5
/title,thermal stress of welds
/prep7
et,1,plane77                              ! 选择单元
```

```
et,2,solid90
v=0.01                                          ! 焊接速度
length=0.05
l_number=length/v
mptemp,1,0,300,600,1000,1300,2000
mpdata,DENS,1,1,7850,7770,7650,7600,6750,6750   ! 焊件性能
mpdata,DENS,2,1,7850,7770,7650,7600,6750,6750
mpdata,C,1,1,450,514,967,1370,2800,2000
mpdata,C,2,1,440,504,957,1380,2790,2000
mpdata,KXX,1,1,67,53,39,31,20,20
mpdata,KXX,2,1,67,53,39,31,20,20
rect,0,0.10,0,0.01                              ! 几何建模
k,5,0.002
k,6,0.002,0.002
k,7,0.00662,0.01
k,8,0.00339,0.01112
k,9,0,0.0115
larc,7,9,8
a,1,5,6,7,9
agen,2,2
asba,1,2
aglue,all
k,20,0,-0.00385
circle,20,0.008,,,90
circle,20,0.012,,,90
asbl,3,4
asbl,2,5
esize,0.00075                                   ! 划分网格
smrtsize,7
mshape,1
amesh,3,5,1
esize,0.003
amesh,1
extopt,esize,l_number
extopt,aclear,1
mat,1
vext,3,5,1,,,length
mat,2
vext,1,,,,,length
nummrg,node
alls
finish
/solu                                           ! 求解设置
```

```
autots,on
outpr,nsol,all
outres,nsol,all
kbc,1
antype,trans                                    ! 瞬态求解
timint,off
nsubst,4
d,all,temp,25
time,0.1
solve                                           ! 求解
timint,on,ther
ddele,all,temp
time=0.01
*dim,s,array,8
*dim,e_node,array,20
*get,elem_max,elem,0,num,max
*get,elem_min,elem,0,num,min
*get,node_max,node,0,num,max
*get,node_min,node,0,num,min
*dim,node_ave,array,node_max
*do,j,node_min,node_max
alls
*if,nsel(j),eq,1,then
nsel,s,,,j
esln,s
*get,node_ave(j),elem,0,count
*endif
*enddo
alls
*do,kk,1,3
r=0.02
*if,kk,eq,1,then
q=3200*0.8
qmax=3*q/3.14/r/r
xc=0.11190e-02
yc=0.21451e-02
v_num=2
time_inc=length/l_number/v
*endif
*if,k,eq,2,then
q=4500*0.8
qmax=3*q/3.14/r/r
xc=0.20454e-02
```

```
yc = 0.67334e - 02
v_num = 1
time_inc = length/l_number/1.5/v
*endif
*if,k,eq,3,then
q = 5800*0.8
qmax = 3*q/3.14/r/r
xc = 0.29574e - 02
yc = 0.94731e - 02
v_num = 3
time_inc = length/l_number/2/v
*endif
*do,j,1,l_number
sfedele,all,all,hflux
vsel,s,,,v_num
eslv,s,1
nsel,r,loc,z,(j-1)*length/l_number + 0.001,j*length/l_number - 0.001
esln,r
ealive,all
zc = (j-0.5)*length/l_number
*do,i,elem_min,elem_max
*if,esel(i),eq,1,then
esel,s,,,i
*do,k,1,8
*get,e_node(k),elem,i,node,k
ss = e_node(k)
disp = sqrt((nx(ss)-xc)*(nx(ss)-xc) + (ny(ss)-yc)*(ny(ss)-yc) + (nz(ss)-zc)*(nz(ss)-zc))
eee = 3*disp*disp/r/r
*if,eee,lt,25,then
s(k) = qmax*exp(-eee)/node_ave(e_node(k))
*else
s(k) = 0
*endif
*enddo
*if,s(1)+s(2)+s(3)+s(4),ne,0,then
sfe,i,1,hflux,,s(1),s(2),s(3),s(4)
*endif
*if,s(1)+s(2)+s(5)+s(6),ne,0,then
sfe,i,2,hflux,,s(1),s(2),s(6),s(5)
*endif
*if,s(6)+s(2)+s(3)+s(7),ne,0,then
sfe,i,3,hflux,,s(2),s(3),s(7),s(6)
*endif
```

```
*if,s(1)+s(4)+s(5)+s(7),ne,0,then
sfe,i,5,hflux,,s(1),s(4),s(7),s(5)
*endif
*if,s(5)+s(6)+s(7)+s(8),ne,0,then
sfe,i,6,hflux,,s(5),s(6),s(7),s(8)
*endif
alls
*endif
*enddo
alls
asel,s,loc,z,0
asel,a,loc,z,length
asel,a,,,20,22,1
asel,a,,,17
sfa,all,1, conv,30,20
alls
time=time+time_inc
nsubst,5,10,3
lnsrch,on
time,time
solve
*enddo
time=time+3600
time,time
sfedele,all,all,hflux
solve
save
*enddo
finish
/prep7
etchg,tts
et,3,combin14
r,1,1000
mptemp
mptemp,1,0,300,600,1000,1300,1400,2000
mpdata,ex,1,1, 2.1e11,1.96e11,1.45e11,2.1e10,0.3e7,2e7,2e7
mpdata,ex,2,1,2.1e11,1.96e11,1.45e11,2.1e10,0.3e7,2e7,2e7
mpdata,prxy,1,1,0.33,0.33,0.35,0.36,0.4, 0.4
mpdata,prxy,2,1,0.33,0.33,0.35,0.36,0.4, 0.4
mpdata,alpx,1,1,12e-6,12.6e-6,13.0e-6,13.4e-6,13.7e-6,14e-6,13.7e-6
mpdata,alpx,2,1,12e-6,12.6e-6,13.0e-6,13.4e-6,13.7e-6,14e-6,13.7e-6
mp,reft,1,20
mp,reft,2,20
```

```
tb,bkin,1.5
tbtemp,15
tbdata,1,280e6,2e9
tbtemp,800
tbdata,1,10e6,1e7
tbtemp,2500
tbdata, 1,10e6,1e6
tbcopy,bkin,1,2
k,50,0.11,0.01
k,51,0.11,0.01,length
l,50,3
l,51,25
type,3
real,1
esize,,1
lmesh,49,50,1
finish
/solu
dk,10,all
da,8,ux
da,14,ux
da,18,ux
antype,trans
outpr,all,all
outres,all,all
kbc,0
autots,on
time,0.02
esel,s,mat,,1
ekill,all
esel,all
nsubst,1
solve
time=0.02
 *do,k,1,3
    *if,k,eq,1,then
   v_num=2
time_inc=length/l_number/v
 *endif
 *if,k,eq,2,then
v_num=1
time_inc=length/l_number/1.5/v
 *endif
```

```
*if,k,eq,3,then
v_num=3
time_inc=length/l_number/2/v
*endif
*do,j,1, l_number
vsel,s,,,v_num
eslv,s,1
nsel,r,loc,z,(j-1)*length/l_number+0.001, j*length/l_number-0.001
esln,r
ealive,all
alls
time=time+time_inc
bfdele,all,temp
ldread,temp,,,time,,,rth
nsubst,10,50,3
lnsrch,on
time,time
nlgeom,on
solve
*enddo
time=time+3600
bfdele,all,temp
ldread,temp,,,time,,,rth
time,time
solve
save
*enddo
finish
/post1
set,,,,,1.02
plnsol,bfe,temp,0,1.0                              ! 温度分布见图 9-8
```

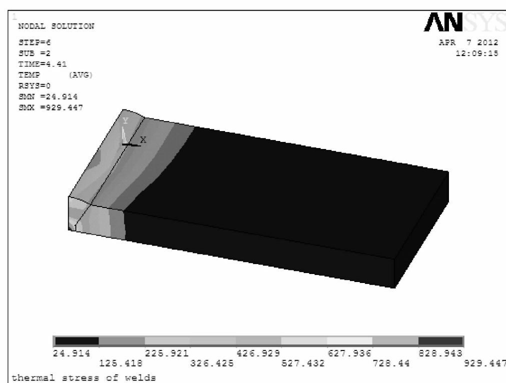


图 9-8　温度场分布

```
plnsol,s,eqv,0,1.0
finish
```

9.3 本章总结

通过本章的学习，读者可以掌握焊接工艺模拟的基本理论和规律，可以采用 ANSYS 软件进行焊接工艺几何模型的建立与温度场和应力场耦合模拟分析。

9.4 练习题

1）异种金属焊接过程分析，图 9-9 所示为焊缝的剖面示意图，用铜焊将钢和铁焊接在一起，利用 ANSYS 软件对焊接后的焊接残余应力、在焊接过程中的温度变化和应力分布进行模拟。由于焊接过程是一个连续操作的过程，为了模拟焊接，就必须要用生死单元和热—结构耦合分析功能来进行焊接过程的模拟。已知各种材料的属性见表 9-4，单位为 SI 单位制。在焊接过程的数值模拟中，进行温度场分析时必须确定下列热物性参数：热导率 λ(W/(m·K))、表面传热系数 h_f(W/(m²·K))、密度 ρ(kg/m³)、比热容 c(J/(kg.K))、焓 H(J/m³) 等参数。材料特性分为线性、非线性和各向异性等。复合焊接中，铝合金的热物性参数如热导率和比热容是温度的函数，更由于焊接过程中塑性变形的产生，其结果必然是和过程相关的。但如果缺乏充分的热物性参数时，可采用生死单元法，仔细考虑非线性选项的确定，或用相近材料的热物性参数替代。

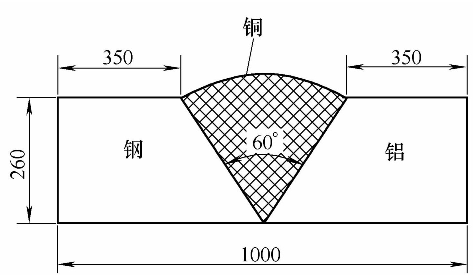


图 9-9 焊缝结构示意图

表 9-4 材料的特性系数

材料	温度/℃	弹性模量/Pa	屈服强度/Pa	切变模量/Pa	材料密度/(kg/m³)	泊松比	热导率/[W/(m·K)]	线膨胀系数/(1/K)	比热容/[J/(kg·K)]
铁	20	1.93e11	1.2e9	1.93e10	7800	0.29	16.3	1.78e-5	502
	500	1.5e11	0.933e9	1.5e10					
	1000	0.7e11	0.435e9	0.7e10					
	1500	0.1e11	0.07e9	0.1e10					
	2000	0.01e11	0.007e9	0.01e10					
铝	20	1.02e11	0.8e9	1.02e10	4850	0.3	7.44	9.36e-6	544
	500	0.5e11	0.4e9	0.5e10					
	1000	0.08e11	0.07e9	0.08e10					
	1500	0.001e11	0.001e9	0.001e10					
	2000	0.0001e11	0.0001e9	0.0001e10					

（续）

材料	温度/℃	弹性模量/Pa	屈服强度/Pa	切变模量/Pa	材料密度/(kg/m^3)	泊松比	热导率/[W/(m·K)]	线膨胀系数/(1/K)	比热容/[J/(kg·K)]
铜	20	1.17e11	0.9e9	1.17e10	8900	0.29	393	1.66e－5	385
	500	0.9e11	0.7e9	0.9e10					
	1000	0.3e11	0.23e9	0.3e10					
	1500	0.05e11	0.04e9	0.05e10					
	2000	0.005e11	0.004e9	0.005e10					

注：假定铝和铁的参考温度为 30℃，铜的参考温度为 1500℃。

2）在焊接的数值模拟中，温度场分析时必须确定下列热物性参数：热导率、表面传热系数、密度、比热容；应力应变场分析则必须确定弹性模量、热膨胀系数、密度和屈服强度等参数。对结构钢 Q235 的焊接过程进行数值模拟，其材料性能见表 9-5。

表 9-5　Q235 材料物理性能

温度/℃	20	200	300	400	500	600
弹性模量/Pa	2.12e11	2.01e11	1.93e11	1.84e11	1.75e11	—
屈服强度/Pa	2.35e8	1.93e8	1.47e8	1.17e8	9.87e7	5.11e5
切变模量/Pa	8.23e10	7.77e10	7.50e10	7.19e10	6.77e10	—
泊松比	0.288	0.294	0.288	0.283	0.289	—
密度/(kg/m^3)	7860					
热导率/[W/(m·K)]	—	61.1	55.3	48.6	42.7	38.1
线膨胀系数/(1/K)	—	1.26e－5	1.33e－5	1.39e－5	1.42e－5	1.46e－5
比热容/[J/(kg·K)]	—	745	770	783	833	—

焊接过程是一个加热非常不均匀的过程，在焊缝处温度梯度变化很大，划分网格时一般不采取均匀的网格，而是在焊缝及其附近的部分用加密的网格，在远离焊缝的区域，温度分布梯度变化相对较小，这时可以忽略细节，划分均匀且相对稀疏的单元网格。总之，在保持精度的同时减少网格的数量。要获得一个良好的焊接温度场，焊缝处的单元网格最好在 2mm 以下。工件为 200mm×200mm×16mm 的平板，形状沿焊缝对称且规则，采用的方案是全部选用四面体划分网格，然后沿焊缝边缘细化网格。把工件分为三个区域，即焊缝区、远离焊缝区和焊缝边缘区。

3）一手工电弧焊焊缝，工件尺寸见图 9-10，焊接热输入为 21000J/s，高斯分布的热源集中系数为 0.013/mm^3，有效半径内的热量输入比例为 98%，焊接速度为 6mm/s，求焊接后的残余应力分布情况。

4）模拟推焊球（见图 9-11）实验，求推焊球过程中的应力分布，铅锡焊料、铜和 BT 衬底材料的参数见表 9-6。

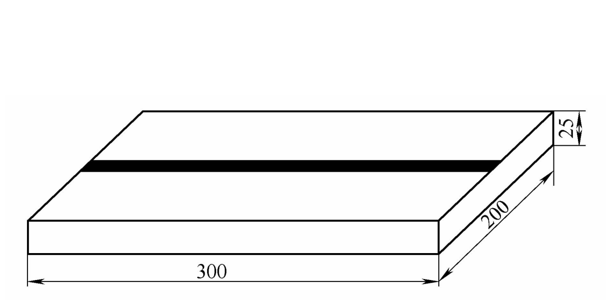


图 9-10 手工电弧焊焊缝

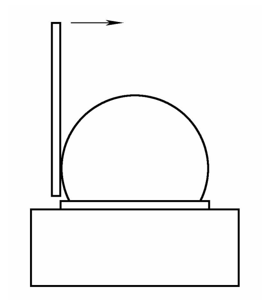


图 9-11 模拟推焊球实验

表 9-6 铅锡焊料、铜和 BT 衬底材料的参数

	泊松比	弹性模量/MPa	密度/(g/cm^3)
铅锡焊料	0.40	29800	8.41
铜	0.34	128700	8.31
BT 衬底	0.39	14000	1.2

第 10 章　基于 ANSYS 软件的热处理过程数值模拟

10.1　热处理工艺及计算机模拟

热处理过程是温度、组织转变、应力三方面相互作用的过程。其关系如图 10-1 所示。图中：

① 表示温度对应力的影响。以淬火为例，冷却初期，零件表面冷却速度高，而心部低，表面收缩量大，而心部小。为保持物体的连续性，表面受到拉应力，心部受到压应力的作用，它们是热应力(或称温度应力)。

② 表示温度对组织转变的作用。热处理本质即在于控制温度变化以获得所需要的组织。

③ 表示组织转变对应力的影响。组织转变引起体积改变，如奥氏体转变成马氏体或贝氏体时体积膨胀。因温度分布、变化不均，零件各部位组织转变不能同时进行，转变量不同，膨胀量也不同，就会产生内应力，这就是组织应力。

④ 表示组织转变对温度场的影响。组织转变时产生潜热，淬火过程中奥氏体转变释放潜热，它反过来又影响温度场的分布。

⑤ 表示应力对组织转变的影响。如在应力作用下改变等温转变时的初始转变时。淬火后残留应力的预测准确性与所采用的材料力学模型密切相关。目前的模拟已经从原来的弹性模型改进为弹塑性模型。

⑥ 表示应力对温度转变的影响。热处理过程是温度、组织转变、应力三方面相互作用的复杂过程，运用间接热固耦合的方法，先进行热分析，利用温度等条件判断出马氏体组织，赋予这部分组织以马氏体的物性参数，这样就考虑了组织应力对残留应力的影响，然后进行应力分析，当温度场冷却到初始状态时，得到的应力状态，就是残留应力状态。

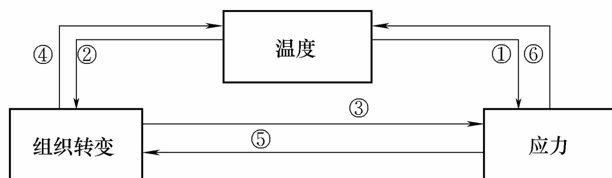


图 10-1　热处理过程中温度、组织转变和应力关系示意图

由于在计算过程中，模型、加热冷却过程及各种物性参数都有一定的误差，应力对组织转变影响的数学模型尚不成熟，因此整个计算模拟过程有一定的误差。要充分发挥数值模拟的优越性，在生产中得到实用并取得重大效益还有不少工作要做。随着计算机技术的不断发展，试验方法和手段的不断完善，试验资料的不断积累，这些难点必将被逐渐克服，可预期在不久的将来会有很好的实用软件问世，并得到广泛应用。

10.2 ANSYS 软件在热处理工艺模拟中的应用实例

10.2.1 实例 1—型钢的空冷过程

一横截面为正八边形、长度为 1000mm 的型钢(见图 10-2)，初始温度为 1000℃，材料性能参数见表 10-1，求其对外进行热辐射 1h 后型钢的温度及型钢中心点温度随时间的变化曲线。

表 10-1 材料性能参数

热导率/[W/(m·K)]	密度 ρ/(kg/m^3)	比热容 c/[J/(kg·K)]	辐射率	斯蒂芬—玻耳兹曼常数
68	7800	465	1	5.67×10^{-8}

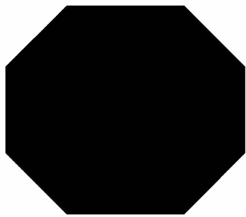


图 10-2 型钢截面示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex10-1                    ! 定义文件名
/title,cooling of a billet         ! 定义工作标题
keyw,pr_therm,1
/prep7                             ! 进入前处理器
smrt,off
et,1,solid70                       ! 定义单元
et,2,surf152
et,3,plane55
keyopt,2,4,1                       ! 定义单元关键字
keyopt,2,5,1
keyopt,2,9,1
r,2,1,5.67e-8
mp,KXX,1,68                        ! 输入物性参数
mp,C,1,465
mp,DENS,1,7800
mp,emis,2,1
/rgb,index,100,100,100,0           ! 设置视图显示颜色
/rgb,index,80,80,80,13
/rgb,index,60,60,60,14
/rgb,index,0,0,0,15
```

```
/replot
rpr4,8,0,0,0.1                ! 生成八边形
/pnum,kp,1
/replot
mshape,0,2d
mshkey,1
type,3
esize,,3
amap,1,1,3,5,7                ! 划分网格
/title,element in plane model
eplot
/view,1,1,1,1                 ! 设置视图观测方向
type,1
esize,,10                     ! 指定单元等分数
voffst,1,1,0                  ! 拖拉面生成体
type,2
real,2
mat,2                         ! 指定材料类型
n,600,0,0,1,1                 ! 生成节点
esurf,600                     ! 生成表面单元
asel,s,type,,3                ! 选择单元类型为 3 的面
eplot                         ! 显示单元
aclear,1                      ! 清除面
allsel
/title,element in model
eplot
finish
/solu                         ! 进入求解器
antype,trans                  ! 分析类型为瞬态分析
time,3600                     ! 指定计算终止时间
deltim,15,15,30               ! 设置最大最小时间步长
toffset,273                   ! 定义温度偏移量
d,600,temp,20                 ! 设定周围介质温度
tunif,1000                    ! 设定型钢初始温度
autots,on                     ! 打开自动时间步长
kbc,1                         ! 选择加载方式
outres,,all
outpr,nsol,last
solve                         ! 开始求解计算
finish
/post1                        ! 进入 post1 后处理器
set,last                      ! 读取最终求解结果
plnsol,temp                   ! 绘制温度场等值线圈
```

```
prrsol,temp                          ! 列表显示节点辐射换热量
finish
/post26                              ! 进入 post26 后处理器
/axlab,x,time,(sec)                  ! 定义 X 坐标轴标题
/axlab, y, temperature
/gthk, axis, 3
/gthk, curve, 3
/color, curve, mred, 1
nsel, s, loc, x, 0
nsel, r, loc, y, 0
nsel, r, loc, z, 0.5
*get, node1, node,, num, max         ! 根据节点坐标读取最大节点编号
nsol, 2, node1, temp,, temp          ! 定义变量 2
/title, curve decribed the relation between temperature and time at center of
billet                               ! 绘制型钢中心点温度随时间变化关系曲线
plvar, 2
finish
/exit, all
```

模拟结果见图 10-3 和图 10-4。

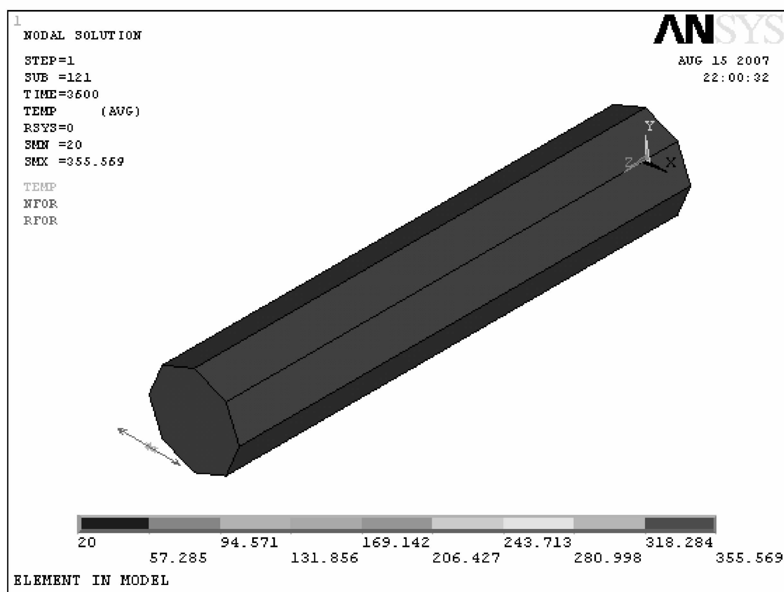


图 10-3　温度场分布等值线图

10.2.2　实例 2—某钢件的油淬过程热应力模拟

钢的淬火是将钢奥氏体化后以适当的冷却速度冷却，使工件在横截面内全部或在一定范围内发生马氏体不稳定组织结构转变的热处理工艺。某钢的热导率为 40W/(m. K)，热膨胀系数为 $1e-5K^{-1}$，弹性模量为 200GPa，泊松比为 0.35，加热到 800℃，然后放进 25℃的油内进行淬火，求温度和热应力分布。

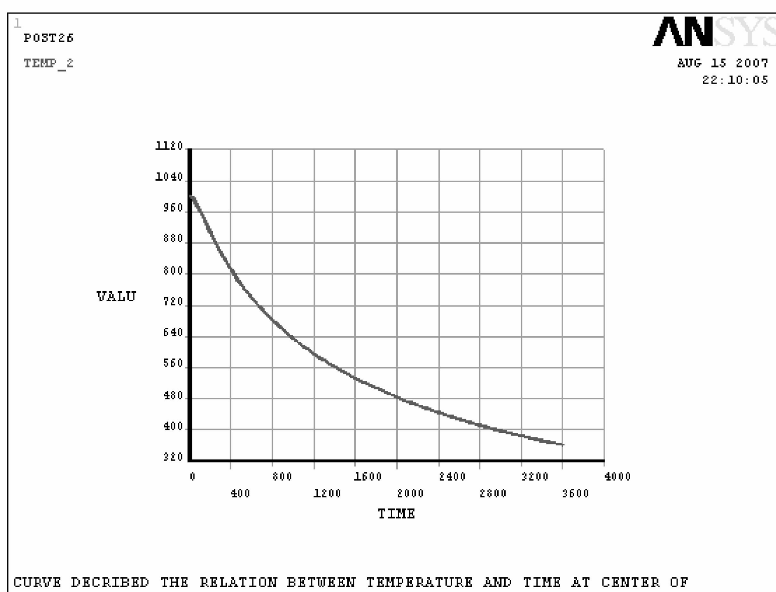


图 10-4　型钢中心点温度随时间变化关系曲线

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex10-2                               ! 定义文件名
/prep7
et,1,plane55
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,kxx,1,,40
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,alpx,1,,1e-5
mpdata,ex,1,,200e9
mpdata,prxy,1,,0.35
k,1,
k,2,5,
k,3,0,5
k,4,8,
k,0,6
k,5,0,8
larc,2,3,1,5
larc,4,5,1,8
l,2,4
l,3,5
al,1,2,3,4
esize,0.5
```

```
amesh,all
finish
/solu
antype,0
dl,1,,temp,800,0
dl,2,,temp,25,0
solve
finish
/post1
/efacet,1
plnsol, temp,, 0
finish
/prep7
etchg,tts                                    ! 热单元转化为结构单元
finish
/solu
dl,4, ,ux,
dl,3, ,uy,
ldread,temp,1,1, ,,'ex10-2','rth',''
solve
finish
/post1
plnsol, s,1, 0,1.0                           ! 温度分布(见图 10-5)
```

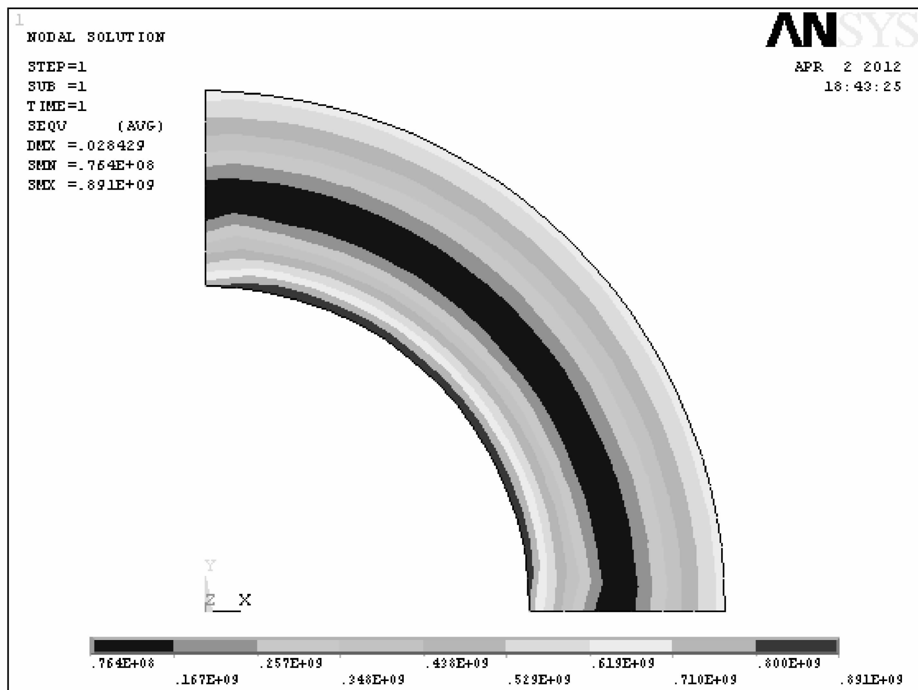


图 10-5 温度场分布等值线图

10.2.3　实例 3—基体表面热喷涂过程温度场和应力场分析

热喷涂技术是通过火焰、电弧或等离子体等热源，将某种线状或粉末状的材料加热至熔化或半熔化状态，并加速形成熔滴，高速喷向基体形成涂层，可以对材料表面性能(如耐磨性、耐蚀性、耐高温隔热性等)进行强化或再生，起到保护作用，并能对因磨损腐蚀或加工超差引起的零件尺寸减小进行恢复。同时，还可以赋予材料表面以特殊性能(如电学、光学等性能)。基于热喷涂市场的巨大潜力及其社会效益和经济效益，在世界范围内，热喷涂技术受到极大的关注。下面举例介绍热喷涂过程中熔滴在基体表面沉积凝固后的残留应力分析。热喷涂过程中，一金属 Ni 熔滴以一定速度在无限大碳钢基体表面沉积后，发生散流变形的同时与基体有热交换作用，最终凝固成圆片状固体颗粒。其纵剖面形状及几何尺寸如图 10-6 所示。金属 Ni 与碳钢的基本物性参数见表 10-2 和表 10-3。假定颗粒由最初的熔点温度 1454℃冷却到室温 25℃，忽略对流带来的影响，假定平均制备温度 625℃为参考温度。若定义路径 1 为线段 *AB*，定义路径 2 为线段 *BC*，求：

1）熔滴经过 100μs 时的温度场分布。

2）点 *A*、点 *B* 的温度随时间的变化曲线。

3）100μs 时，熔滴的径向应力场。

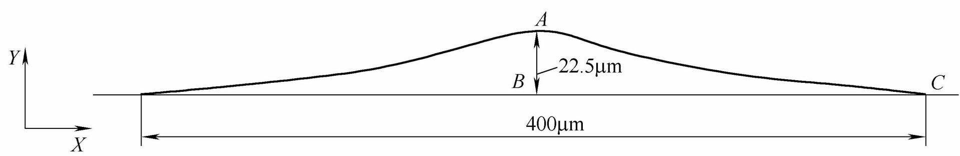


图 10-6　熔滴在基体表面凝固后的纵剖面形状及几何尺寸

表 10-2　熔滴的材料属性(Ni)

弹性模量/GPa		204		355℃	1.45e6
泊松比		0.28		360℃	1.50e6
热膨胀系数/(1/K)		13.3e-6	焓/(kJ/mol)	365℃	1.55e6
热导率/[W/(m·K)]		87.86		1454℃	6.65e6
焓/(kJ/mol)	25℃	8.48e5		0℃	0

表 10-3　基体的材料属性(碳钢)

弹性模量/GPa	215	热导率/[W/(m·K)]	71
泊松比	0.26	密度/(kg/m^3)	7900
热膨胀系数/(1/K)	13.3e-6	比热容/[J/(kg·K)]	460.24

问题分析：根据题意，可将问题简化为二维轴对称问题，分析过程中取纵剖面的一半进行求解，如图 10-7 所示，对称向上取对称约束。对于无限大碳钢基体可在建模过程中取远远大于颗粒的尺寸近似代替(本例按矩形取 2000μm×1000μm)。求解热应力采用间接耦合法，即先用 P1ane55 单元完成温度场计算后，再转换成 Plane42 单元，计算热应力。



图 10-7 模型的对称简化

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex10 - 3
/title,thermal stress analysis of a molten in hot spraying
/prep7
et,1,55,,,1                                              ! 定义单元
mp,ex,1,0.204                                            ! 输入材料 1 弹性模量
mp + nuxy,1,0.28                                         ! 输入材料 1 泊松比
mp,alpx,1,13.3e - 6                                      ! 输入材料 1 热膨胀系数
mp,KXX,1,87.86e - 6                                      ! 输入材料 1 热导率
mptemp,1,0,25,355,360,365,1454                           ! 建立温度参数表
mpdata,ENTH,1,1,0,8.48e - 5,1.45e - 3,1.5e - 3,1.55e - 3,6.65e - 3  ! 输入不同温度下材料 1 的焓值
mp,ex,2,0.215                                            ! 输入材料 2 弹性模量
mp,nuxy,2,0.26                                           ! 输入材料 2 泊松比
mp,alpx,2,11.3e - 6                                      ! 输入材料 2 热膨胀系数
mp,DENS,2,7.9e - 9                                       ! 输入材料 2 密度
mp,KXX,2,7.1e - 5                                        ! 输入材料 2 热导率
mp,C,2,460.24                                            ! 输入材料 2 比热容
k, 1,,22.5, 0
k, 2, 10, 22
k, 4, 30, 16.5
k, 5, 40, 13.8
k, 7, 60, s.5
k, 8, 70, 7.5
k, 10, 90, 4.5
k, 11, 100, 2.8
k, 13, 200, 0
k, 14, 0, 0
*do, i, i, 13
lstr, i, i + 1
*enddo
lstr,14,1                                                ! 连接关键点 14 与 1,生成线
al,all                                                   ! 选择所有线生成面
rectng,0,2000, - 1000,0,                                 ! 生成矩形面
aglue,all                                                ! 将面 1 与面粘接在一起
numcmp,area                                              ! 压缩面编号
asel,s,area,,2                                           ! 选择面 2
aatt,2,                                                  ! 将面 2 赋予材料属性 2
```

```
asel,all                                    ! 选择所有面
amesh,all                                   ! 划分网格
nummrg,node                                 ! 合并重合节点
save. hotspray. db
/solu                                       ! 进入求解器
antype,4                                    ! 指定分析类型为瞬态分析
solcontrol,on                               ! 激活优化的非线性求解控制
esel,s,mat,,1                               ! 选择材料 1 对应的所有单元
nsle,s                                      ! 选择所选单元对应的所有节点
ic,all,temp,1 4 5 4                         ! 在熔滴上施加初始边界条件 1454℃
esel,s,mat,,2                               ! 选择材料 2 对应的所有单元
nsle,s                                      ! 选择所选单元对应的所有节点
ic,all,temp,25                              ! 在基体上施加初始边界条件 25℃
allsel,all                                  ! 选择全部实体
time,100                                    ! 设置计算时间为 100μs
autots,on                                   ! 打开自动时间步长
deltim,1                                    ! 指定时间步长为 1
kbc,0                                       ! 按 rampped 方式加载
outres,all,all                              ! 将每一步计算结果均输出到结果文件
solve                                       ! 开始求解
save,hotspray. db                           ! 将当前计算结果保存到文件 hotspray. db
/post1                                      ! 进入 post1 后处理器
/plopts,info,on                             ! 显示图例栏
esel,s,mat,,1                               ! 选择材料 1 对应的所有单元
/title,temperature contours for the ni particle at 100e-6s
plnsol,temp                                 ! 绘制 100μs 时熔滴的温度场分布(见图 10-8)
/post26                                     ! 进入 post26 后处理器
nsol,2,1,temp,,point-a                      ! 定义变量 point-a
nsol,3,4 2,temp,,point-b                    ! 定义变量 point-b
/title,temperature history for point a and point b
plvar,2,3                                   ! 绘制 a、b 两点的温度—时间曲线
allsel,all                                  ! 选择所有实体
/prep7                                      ! 进入前处理器,进行应力场分析
etchg,tts                                   ! 转变单元类型
keyopt,1,3,1                                ! 为单元设置轴对称关键点
nsel,s,loc,x,0                              ! 选择 x=0 处的所有节点
d,all,,0,,,,ux                              ! 定义 ux=0 约束
tref,625                                    ! 设置参考温度为 625℃
allsel,all                                  ! 选择所有实体
ldread,temp,,,,,'hotspray','rth',''         ! 从文件 hotspray. db. rth 读取温度载荷
/solu                                       ! 进入求解器
solve                                       ! 开始求解计算
save,hotspray. db,db                        ! 将当前计算结果保存到文件 hotspray. db
```

```
/post1                                                      ! 进入 post1 后处理器
esel,s,mat,,1                                               ! 选择材料 1 对应的所有单元
path,path1-sx,2
ppath,1,1
ppath,2,42
pdef,path1-sx,s,x,avg
/title,radial stress for path1
plpath,pathl-sx                                             ! 绘制路径 1 沿径向的应力变化曲线
path,path1 sy,2
ppath,1,1
ppath,2,42
pdzf,path1 sy,s,y,avg
/title,axial stress for path1
plpath,path1-sy                                             ! 绘制路径 1 沿轴向的应力变化曲线
path,path2-sx,2                                             ! 定义沿径向的路径 2
fpath,1,42
ppath,2,35
pdef,path2-sx,s,x,avg
/title,radial stress for path2
plpath,path2-sx                                             ! 绘制路径 2 沿径向的应力变化曲线
path,path2 sy,2                                             ! 定义沿轴向的路径 2
ppath,1,42
ppath,2,35
pdef,path2-sy,s,y,avg
/title,axial stress for path2
plpath,path2-sy                                             ! 绘制路径 2 沿轴向的压力变化曲线(见图 10-9)
/title,radial stress for the nt particle at 100e-6s
plesol,s,x                                                  ! 绘制 100μs 时,熔滴的径向应力场
etable,sx,s,x                                               ! 建立径向应力单元表 sx
etable,sy,s,y                                               ! 建立轴向应力单元表 sy
smult,sx-npa,sx,,1000000,1                                  ! sx 乘以 1e 6 得到单元表 sx-mpa
smult,sy-mpa,sy,,10000000,l                                 ! sy 乘以 1e6 得到单元表 sy-mpa
pletab,sx-mpa,avg                                           ! 绘制 100μs 时熔滴的径向应力场
/title,axial stress for the ni parttcle at 100e-6s
pletab,sy-mpa,avg                                           ! 绘制 100μs 时熔滴的轴向应力场
/expand,9,axi,,,10                                          ! 设置三维扩展模式
/replot
/title,3d padiai. stress for the ni particle at 100e-6s
plesol,s,x                                                  ! 绘制 100μs 时熔滴的径向应力场(见图 10-10)
/title,3d axial stp,ess for the ni particle at 100e-6s
/exit,all                                                   ! 退出 ANSYS
```

10.2.4 实例 4—化学热处理过程扩散浓度的计算

渗碳是为了增加钢件表层的含碳量和一定的碳浓度梯度，将钢件在渗碳介质中加热并保

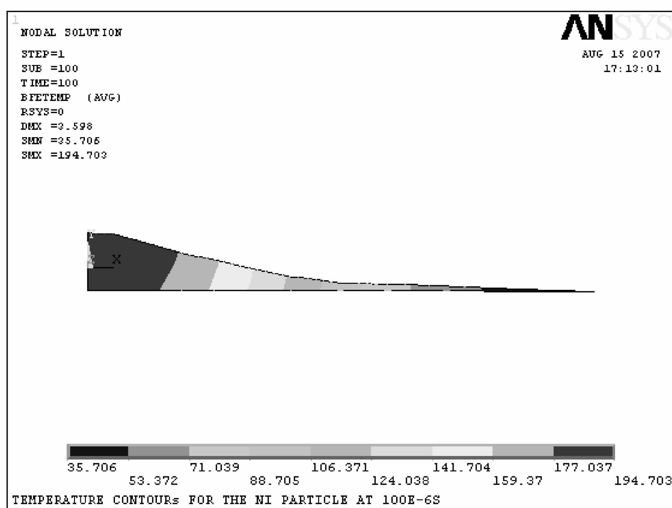


图 10-8　100μs 时熔滴的温度场分布

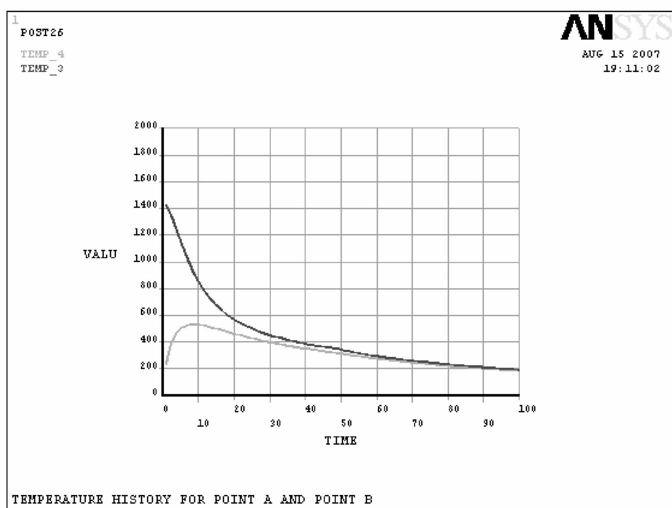


图 10-9　*A* 点和 *B* 点的温度随时间的变化曲线

温使活性碳原子渗入钢件表层的化学热处理工艺称为渗碳，渗碳钢一般采用普通碳钢、优质碳素结构钢和低碳合金结构钢，也可采用 Q235 钢。

某种低碳铁或钢处于甲烷（CH_4）与一氧化碳（CO）混合气中，950℃左右保温。渗碳的目的是使铁的表面形成一层高碳层，即表面含碳量高于 0.25%（质量分数），以便进一步作热处理。碳在 γ 铁中的溶解度为 1%（质量分数）。在 950℃时，碳的扩散系数 *D* 约为 $1.61\times10^{-12}m^2/s$。求扩散处理时间为 10^4s（约 3h）后，碳在 γ 铁中的浓度分布。工件的长宽各为 2000mm，厚为 100mm。边界条件及初始条件：钢工件含碳量边界浓度为 0.01，边界碳浓度为 0.1。

1）理论基础的相似菲克第一定律（一定时间内，浓度不随时间变化 $dc/dt=0$）。

单位时间内通过垂直于扩散方向的单位截面积的扩散物质流量（扩散通量）与该面积的

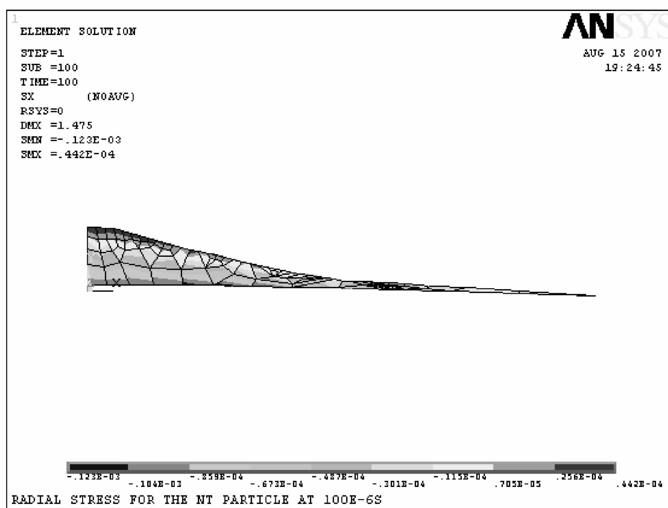


图 10-10　100μs 时熔滴的径向应力场

浓度梯度成正比。定义：组分 i 每单位时间通过单位面积的质量传输量正比于浓度梯度。定义式：

$$n_i = \frac{\partial c_i}{\partial x} D_i$$

式中，D_i 为扩散系数，负号表示质量传输的方向与浓度梯度的方向相反；n_i 为扩散通量，$g/(cm^2 \cdot s)$负号表明扩散通量的方向与浓度梯度方向相反。可见，只要存在浓度梯度，就会引起原子的扩散，而对于热传导定律(傅里叶假设)为

$$Q_\gamma = Ak_\gamma \frac{dT}{dn} \text{或者 } q = \frac{Q_\gamma}{A} = -k_\gamma \frac{dT}{dn}$$

式中，Q_γ 为热(流)量；A 为断面面积；dT/dn 为温度场梯度值；q 为热传导热流强度；k_γ 为传热系数。

2） 微分方程相似。

扩散场微分方程：对于不可压缩各向异性非均质无源稳定扩散微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{sx}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{sy}\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{sz}\frac{\partial h}{\partial z}\right) = 0$$

对于可压缩各向异性非均质非稳定瞬态渗流微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{sx}\frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{sy}\frac{\partial h}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{sz}\frac{\partial h}{\partial z}\right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

式中，k_{sx}、k_{sy}、k_{sz}为 x、y、z 方向的渗透系数；S_s 为单位贮存量。

温度场微分方程：

对于无热源的各向异性非均质稳定热传导微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{rx}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{ry}\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{rz}\frac{\partial T}{\partial z}\right) = 0$$

对于无热源的各向异性非均质瞬态热传导微分方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_{rx}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k_{ry}\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_{rz}\frac{\partial T}{\partial z}\right) = c \frac{\partial T}{\partial t}$$

式中，$k_{\gamma x}$、$k_{\gamma y}$、$k_{\gamma z}$为 x、y、z 方向的表面传热系数；c 为比热容。

3）初始条件与边界条件的相似，表 10-4 是 ANSYS 中扩散场与温度场各种相应量的比较。

扩散场的初始条件：$h|_{t=t_0}=h(x,y,z)$

热传导温度场的初始条件：$T|_{t=t_0}=T(x,y,z)$

第一类边界条件：

扩散场 $h(M,t)|_{M\in S_1}=\varphi_s(M,t)$

温度场 $T(M,t)|_{M\in S_1}=\varphi_r(M,t)$

式中，$h(M,t)$、$T(M,t)$为时刻 t 点 M 的浓度值和温度值；$\varphi_s(M,t)$、$\varphi_r(M,t)$为边界上给定的浓度和温度函数；M 为边界 S_1 上的点。

第二类边界条件：

扩散场 $$k_{sn}\frac{\partial h}{\partial n}\bigg|_{M\in S_2}=v_{S_2}(M,t)$$

温度场 $$k_{rn}\frac{\partial T}{\partial n}\bigg|_{M\in S_1}=q_{S_2}(M,t)$$

式中，k_{sn}、k_{rn}为沿边界法线方向的渗透系数和表面传热系数；$\partial h/\partial n$、$\partial T/\partial n$ 为扩散场和温度场沿边界法线方向的梯度值；$v_{S_2}(M,t)$、$q_{S_2}(M,t)$为边界上给定的已知流速和热流强度函数；M 为边界 S_2 上的点。在不扩散边界和绝热边界上，则有 $v_{S_2}(M,t)=0$ 和 $q_{S_2}(M,t)=0$。

表 10-4　ANSYS 中扩散场与温度场各种相应量的比较

	位函数	特征参数	
扩散场	浓度梯度 h	扩散系数 k	单位存量 S_s
温度场	温度 T	表面传热系数 h	比热容 c

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex10-4                            ! 定义隐式热分析文件名
/prep7                                     ! 进入前处理器
et,1,solid70                               ! 选择单元类型
mp,KXX,1,1.61e-12                          ! 定义钢板的扩散系数
block,0,0.01,0,0.01,-0.005,0.005           ! 建立 1/4 工件三维几何模型
allsel,all
esize,0.0003,0,                            ! 定义单元划分尺寸
mshkey,1                                   ! 设置映射划分单元类型
vmesh,all                                  ! 划分单元
/solu                                      ! 进入求解器
tunif,0                                    ! 定义初始温度
sfa,1,1,conv,0.01,1                        ! 在 1 号面上施加浓度载荷
sfa,2,1,conv,0.01,1                        ! 在 2 号面上施加浓度载荷
sfa,4,1,conv,0.01,1                        ! 在 4 号面上施加浓度载荷
sfa,6,1,conv,0.01,1                        ! 在 6 号面上施加浓度载荷
antype,trans                               ! 设置为瞬态求解
```

```
kbc,1
outres,,all                    ! 定义结果输出
toffst,1                       ! 定义偏移量
allsel,all                     ! 选择所有节点
autots,on                      ! 打开自动时间开关
deltim,500,500,1000            ! 定义时间子步
time,18000                     ! 定义求解时间
solve                          ! 求解
/post1                         ! 进入后处理器
set,last                       ! 读入最后子步结果
plnsol,temp, ,0,               ! 显示浓度分布云图(见图 10-11)
finish
```

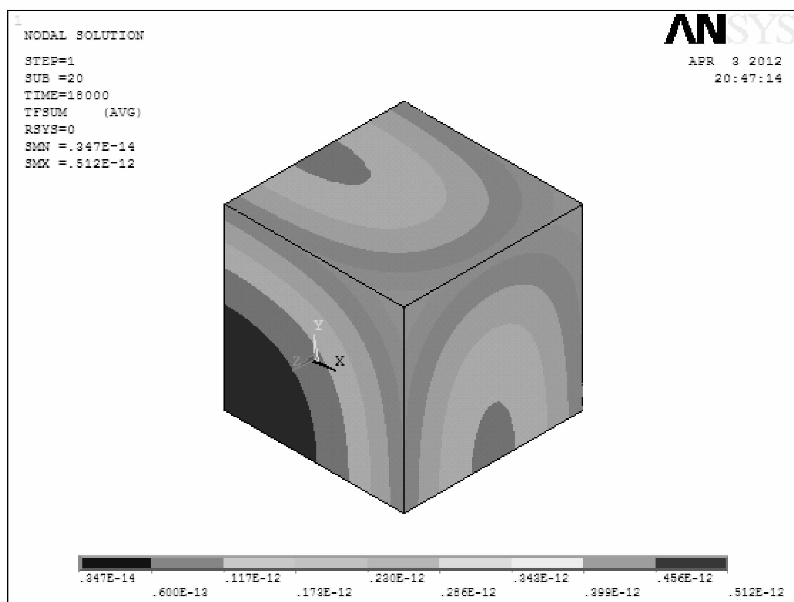


图 10-11 碳浓度分布云图

10.3 本章总结

通过本章的学习，读者可以掌握热处理工艺模拟的基本理论和规律，可以采用 ANSYS 软件进行热处理工艺的几何模型的建立与温度场和应力场耦合模拟分析。通过本章的学习可以对冷喷涂和热喷涂等材料表面处理技术及其模拟有一定程度的了解，可以应用 ANSYS 软件进行喷涂方面的热应力和变形方面的模拟，进一步深化 ANSYS 软件的应用。

10.4 练习题

1）假设现有一个长 2m、宽 1m、高 1m 的长方体，初始温度为 20℃，现将此长方体放入热处理炉中，试分析在一定的时间内(比如 30min)该长方体内的温度变化情况。炉子温度

从 20℃升温，假设经过 30min 升温到 700℃(实际情况可能不是如此)。

2）钢球淬火过程分析。问题描述：一个直径为 0.2m，温度为 500℃的钢球突然放入温度为 0℃的水中，材料性能参数见表 10-5。表面传热系数为 650W/(m^2·K)，求 1min 后钢球的温度场和应力场分布以及球心温度随时间的变化规律。

表 10-5　钢的材料性能参数

密度/(kg/m^3)	热导率[W/(m·K)]	比热容/[J/(m·K)]	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/(1/K)
7800	70	448	220	0.28	1.3e-6

该问题属于瞬态热传导问题。根据对称性，取钢球中心截面的 1/4 建立几何模型，并选择 PLANE13 热结构耦合单元进行分析求解。画等效应力等直线云图。

3）带轮淬火过程分析。图 10-12 所示为一带轮的零件图(图中长度单位为 mm)，带轮材料的热性能参数见表 10-6。带轮的初始温度为 500℃，将其突然放入温度为 0℃的水中，水的表面传热系数为 110W/(m^2·K)。求解：①1min 及 5min 后带轮的温度场分布。②零件图上 A、B、C、D、E 各点温度随时间的变化关系。B、E 两点距中心轴的距离 L_{OB} = 125mm，L_{OE} = 350mm。

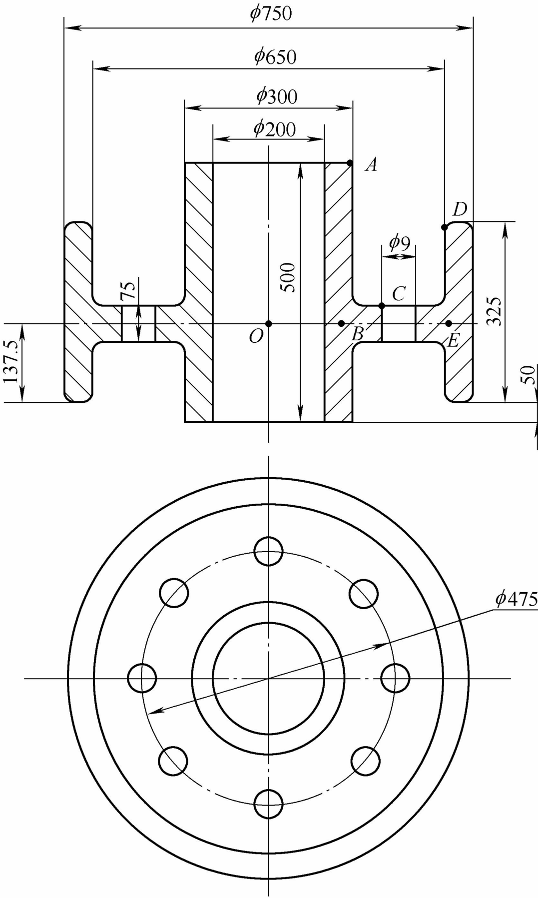


图 10-12　带轮零件图

表 10-6　带轮材料热性能参数

密度/(kg/m^3)	热导率/[W/(m·k)]	比热容/[J/(kg·K)]
2400	70	328

4）激光淬火是利用激光在要热处理的部分扫描，使被扫描区域快速升温，而未被扫描区域保持常温。激光淬火的原理和普通热处理是相同的，只不过激光作为热源加热金属的时间很短，处理区域也很小。激光对金属进行热处理时，金属表面温度和热穿透深度都和激光照射时间的平方成比例。所以适当地调节激光光斑尺寸、扫描速度和激光功率，就可以对金属表面温度和热穿透深度进行控制。采用 ANSYS 软件对 45 钢零件在激光扫描过程中的瞬时表面温度场进行模拟，并根据各模拟情况，推测出激光淬火比较适合的扫描速度、光斑尺寸和激光功率。激光淬火属热瞬态分析，应建立三维六面体单元 SOLID70 进行有限元分析。三维热实体单元 SOLID70 具有 8 个节点，每个节点有一个温度自由度。该单元可用于三维的稳态或瞬态热分析。以 45 钢为例：密度为 7.85g/cm^3，其他性能参数见表 10-7 和表 10-8。

表 10-7　45 钢的比热容、热导率与温度的关系

T/℃	20	100	200	300	400	500
c_P/[J/(kg·K)]	472	480	498	524	560	615
λ/[W/(m·K)]	47.7	43.5	40.4	38.1	36.0	34.16
T/℃	600	700	755	800	900	1000
c_P/[J/(kg·K)]	700	854	1064	806	637	602
λ/[W/(m·K)]	31.98	28.66	25.14	26.49	25.92	24.02

表 10-8　45 钢的表面传热系数 h_c 与温度 T 关系

T/℃	50	100	200	300	350	400
h_c/[W·$(m^2·K)^{-1}$]	2000	3800	6000	13500	14000	12500
T/℃	500	600	700	800	850	
h_c/[W·$(m^2·K)^{-1}$]	7000	4200	1500	500	300	

表 10-9　激光的热流密度

激光功率/W	光斑直径/mm	热流密度/(W/m^2)
800	6	11317684
1000	4	31830988
1000	6	14147106
1000	8	7987747
1200	6	16976527

热流密度其数值是指材料表面吸收的功率密度 F，$F=\dfrac{\eta\times P}{a}$，其中，$\eta$ 为吸收率，假设 40%，P 为激光功率，a 为光斑面积。故适当改变功率密度就可以模拟试验出不同光斑直径，不同激光功率的试验。热流密度其数值见表 10-9。

5）零件几何模型如图 10-13 所示，初始温度为 550℃，置入恒温为 50℃的油池内淬火，其表面传热系数为 530W/(m^2·K)，比热容为 460J/(kg·K)，密度为 7850kg/m^3，热导率为 35W/(m·K)，计算 5min 后零件的温度分布。共 10 个小孔，直径为 10mm，底盘高 10mm，圆柱高 50mm。

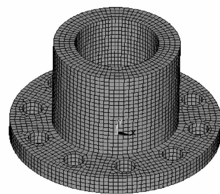


图 10-13　筒形零件

6）冷喷涂过程中固态粒子与基体的变形分析。

冷喷涂过程是利用高压(1～3MPa)气体通过缩放 Laval 喷管产生超声速流动，将粉末粒子(5～50μm)从轴向送入高速气流中，经加速后，在完全固态下撞击基体，发生较大的塑性变形而沉积于基体表面上形成涂层。

目前，冷喷涂得到了国际上的广泛关注。但由于粒子小(微米级)，速度高，所以变形时间十分短，目前无法了解粒子的具体变形过程，而计算机技术的发展给这方面的研究提供了基础。直径为 20μm 的铜粒子以 500m/s 的速度撞击相对无限大的铜基体，求解粒子和基体相互作用过程中的应力、应变变化。

粒子与基体变形分析的求解思路。对于这种高速碰撞问题，由于高度的非线性，采用 ASYS/LS-DYNA 求解。由于碰撞过程的轴对称性，物理模型采用二维轴对称模型，如图 10-14 所示。考虑计算时间问题，基体模型尺寸不能太大，只取 10 倍粒子直径大小，不影响我们对变形区的观察。单位采用国际标准单位制。

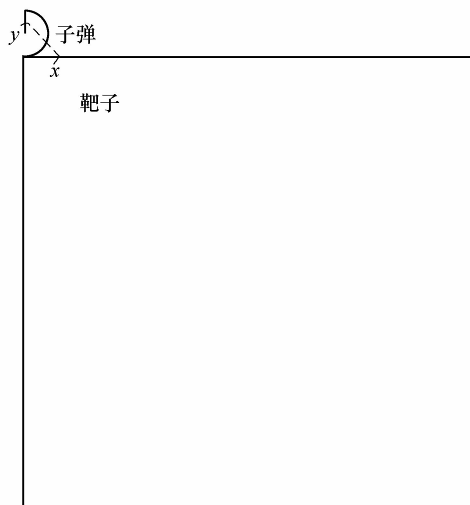


图 10-14　物理模型

第 11 章　基于 ANSYS 软件的材料工程失效分析数值模拟

11.1　基于 ANSYS 失效分析基础

随着计算机技术的迅猛发展，发达国家的制造业广泛地采用了计算机技术，CAD、CAM、CAE、FMS 等技术已得到了普及应用。有限元分析方法已被广泛应用于制造过程的计算机仿真，如金属成形加工过程的计算机模拟、铸造和焊接凝固过程的数值模拟、热处理过程的金属组织内部应力分布的模拟等。这些仿真模拟是构成虚拟制造最主要的部分。但是现实生产中的环境是千差万别的，要模拟真实，计算模型就必须考虑实际生产所用的结构、材料、工艺参数。尽管目前对材料热处理以后的性能已有计算模拟的研究，但对大型工业结构在现场热处理状态下的热响应却还鲜有研究报道，因此人们目前还难以预见诸如容器、球罐类结构在现场整体热处理过程中可能出现的问题。

疲劳是结构在承受低于其极限载荷力的反复作用下发生破裂的现象。例如，一根钢条或许可以承受只有 300kN 的静态拉力的作用，但在 200kN 的力的反复作用下，就很可能发生破坏。引起疲劳失效的主要因素包括：经历的载荷周期数；单周期内应力的变化幅度；单周期内的平均应力；局部应力集中的存在。当计算在预计的生命周期中某个部分的耗用状况时，一个正式的疲劳评估要涉及以上任何一个因素。

11.1.1　基本术语

ANSYS 有以下疲劳计算能力。用户可以对现有的应力结果进行后处理来确定任何实体单元和壳单元的疲劳耗用因数(对于线单元模型疲劳分析,用户也可以手工输入应力)。用户可以在预先选定的位置上确定一定数目的事件以及这些事件中的载荷，然后保存这些位置上的应力。用户可以为每个位置定义应力集中系数和给每个事件定义比例因数。

位置，在模型上所要保存疲劳应力的节点。用户通常可以选取结构上易于发生疲劳破坏的点的位置。

事件，是在某个特定的应力循环中出现在不同时刻的一系列应力状态。更多信息请参考本章后面的获取精确耗用系数指南。

载荷，是一个应力状态，是事件的一部分。

交变应力强度是任何两个载荷间的应力状态差的测量值，程序不因平均应力的影响而调整交变应力强度。

11.1.2　疲劳计算的步骤

1. 进入后处理器 POST1

疲劳计算是应力计算结束后在通用后处理器 POST1 中进行的。通常包括以下五个主要

步骤：进入通用后处理 POST1，恢复数据库；设定尺寸(位置、事件和载荷的数目)，定义疲劳材料特性，确定应力位置，定义应力集中因数；保存感兴趣的位置上不同的事件和载荷的应力，指定事件循环和比例因数；激活疲劳计算；查看结果。

进入通用后处理器 POST1，恢复数据库，为了进行疲劳计算，需要遵循以下步骤：

1）进入 POST1。命令：/POST1。

2）把数据库文件(jobname. db)读入正运行的内存中。(如果您的疲劳计算是接着应力计算进行的,那么数据库文件就已经在内存中了)，还需要一个含有节点应力的结果文件(jobname. rst)，你可以随后读入。命令：RESUME。

2. 设定大小、疲劳材料的性质和位置

定义以下数据：位置、事件和载荷的数目的最大值；疲劳材料性质；应力位置和应力集中因数。

（1）定义应力位置、事件和载荷的数目的最大值　在默认的条件下，最多可以考虑 5 个节点位置，10 个事件，每个事件中 3 个载荷。必要时，用户可以通过以下选项设置更多数目(也就是允许更多的位置、事件或节点)。命令：FTSIZE。

（2）定义材料疲劳特性　为了计算疲劳耗用因数和考虑弹塑性简化计算的影响，用户必须定义材料疲劳特性。在疲劳评价中感兴趣的材料特性有：

1）S－N 曲线，即交变应力强度($(S_{max}-S_{min})/2$）和允许循环次数曲线。ASME S-N 曲线解决了最大平均应力的影响。必要时，用户应该调整 S－N 曲线来解决平均应力的影响。如果没有输入 S－N 曲线，关于所有可能应力状态合成的交变应力强度将会以从大到小的顺序列举出来，但是不进行任何耗用因数的计算。命令：FP。

2）Sm－T 曲线，即设计应力集中值—温度曲线，当用户需要程序判别名义应力范围是否已经进入塑性阶段时就需要用到这条曲线。命令：FP。

3）弹塑性材料参数 M 和 N(加工硬化指数)，只有根据简化的弹塑性规则计算时，这个参数才会被用到。两个参数值可以从 ASME 代号中查得。命令：FP。

（3）定义应力位置和应力集中因数　下面的选项允许用户明确定义疲劳计算中一个感兴趣的节点位置，以及定义此位置的应力集中因数(SCFs)和为其指定一个不长于 20 字符的标题。

命令：FL，GUI：Main Menu > General Postproc > Fatigue > Stress Locations。

注意：并非所有的疲劳分析都要求用到 FL 命令，当执行 FS、FSNODE 或 FSSECT 命令时，节点的位置就会被自动指定。如果模型有充足的细网格，就没必要计算出 SCFs，因为应力已经相当精确。然而，由于表面、尺寸或腐蚀的影响，补充的 SCFs 仍然需要。当只有一个位置时，可以不用定义标题。如果不要求明确定义位置、SCFs 或标题时，FL 命令也完全可以不用。

（4）保存应力，指定事件循环和比例因数　保存应力是为了进行疲劳评价，程序必须获知在不同事件点的应力和每个位置的载荷，也要知道每个事件的循环次数。可以通过以下选项存储每个位置、事件和载荷组合的应力。手工存储应力；从 jobname. rst 文件中获得节点应力；横截面处的应力。

注意：程序假定零应力状态是不存在的，如果零应力是要考虑的应力状态之一，那么必须在它可能出现的每个事件中明确输入。表 11-1 说明了怎样存储应力。在某些情况下，用户或许更愿意用 LCASE 命令而不用 SET。

表 11-1 存储应力命令列

手工存储应力	FS
从 Jobname. rst 中获得节点应力	SET，FSNODE
横截面处的应力	PATH，PPATH，SET，FSSECT
横截面处的计算也需要从 Jobname. rst 文件中获取数据	

在一个事件中，可以用多种方法来存储应力，下面详细阐述这些方法的用法：

1）手工存储应力，可以用此选项手工存储应力和温度（不需要直接访问 jobname. rst 文件）。在这种情况下，不是在 POST1 中把疲劳分析模块作为后处理器，而只是作为疲劳计算的工具。如梁单元等线单元必须这样来处理，因为这里和实体单元和壳单元不同，疲劳模型不能从 jobname. rst 文件中获取数据。命令：FS。

2）从 jobname. rst 文件中获取节点应力，使用这个选项时，就生成了要存储的含有 6 个应力分量的一个节点矢量，这些应力分量可以直接用结果数据库文件来保存。

注意：在执行 FSNODE 命令之前，用户必须使用 SET 命令，可能也要用到 SHELL 命令。SET 命令用来从结果文件中把对应于某个特定的载荷步的结果读入数据库文件。SHELL 命令为壳单元从顶部、中部或底部面（默认为顶面）选择结果数据。命令：FSNODE。

3）横截面处的应力，这个选项用来计算和存储（先前用 PATH 和 PPATH 命令定义的）截面路径末端的总线形化应力，由于准备对代表两个表面之间的最短距离进行线形化，在 PPATH 命令里只需用两个面的节点来描述路径。这个选项从结果数据库文件中提取应力信息。因此在使用 FSSECT 时应使用 SET 命令。用 FSSECT 命令存储的应力分量可以用随后的 FS 命令来更改。命令：FSSECT。

4）列出、显示和删除存储的节点应力，用下面的选项来列出、显示和删除存储的节点应力：①列出每个位置、事件、载荷和每个应力条件的存储应力，命令：FSLIST。②显示一个应力项作为某个特定的位置和事件的载荷数的函数，命令：FSPLOT。③删除存储在某个位置、事件和载荷上的一个应力条件，命令：FSDELE。④删除某个位置上的所有应力，命令：FL。⑤删除某个事件的所有载荷上所有应力，命令：FE。

5）指定事件重复次数和比例因数，本选项用来指定事件的发生次数（事件的所有位置上的所有载荷），也可以用来为所有组成载荷的应力指定比例因数。命令：FE。

（5）激活疲劳计算　既然已经指定了位置、应力、事件和材料参数，就可以在指定的位置执行疲劳计算了。位置可以通过位置编号或节点本身来指定。命令：FTCALC。

（6）查看结果　疲劳计算的结果通过输出窗口显示出来，如果已经把结果输出［/OUTPUT］到文件（比如 jobname. out），那就可以列出这个文件来查看结果。命令：LIST。

如果用户已经输入 S-N 曲线，输出则是以一个表格的形式，主要包括交变应力强度（以从大到小的顺序列出）及相应的数对事件/载荷、允许的循环、经过的循环、温度和部分使用因数。接下来是特定位置的累积使用因数，这个信息对所有的位置来说是重复的。正如刚才提到的，FTCALC 命令输出显示了起作用的对应任何给定的交变应力强度范围的事件和载荷。这个信息有助于用户分离出引起最大疲劳破坏的瞬间现象。更改事件的一个方便的方法是把存储的所有疲劳信息写到 Jobname. fatg 中去（这个操作既可在 FTCALC 命令之前，也可在其后）。用户可以通过编辑 Jobname. fatg 文件来修改事件，然后使用/INPUT 命令重新读入更

改过的疲劳指令。命令：FTWRITE。

11.2　ANSYS 软件在材料工程疲劳分析模拟中的应用实例

11.2.1　实例 1—回转窑托轮有限元可靠性分析

回转窑是一个典型的大型复杂系统，由很多具有不同功能和物理机制并在行为上相互耦合、强烈相关的子系统组成。回转窑的托轮支撑着回转窑回转部分的全部重量，并在径向通过滚圈对窑筒体起定位作用。

对托轮与托轮轴的过盈配合问题的分析(见图 11-1)。传统上一般将托轮简化成厚壁圆筒，根据托轮正常工作时需要传递的摩擦力及摩擦力矩，考虑托轮轴孔不出现塑性变形的约束条件，用材料力学的方法确定过盈配合需要的过盈量。这种方法通常将托轮轴的作用简化为相应的力作用在托轮上，因而该法只能反映托轮在某一时刻和某一位置受力时的力学特征，不能精确反映托轮和托轮轴的实际结构对变形和应力的影响。因此，将托轮简化为厚壁圆筒来设计托轮与托轮轴的过盈配合关系，将使过盈配合的可靠性和设计质量受到影响。为了精确确定托轮和托轮轴表面的接触压力，以及托轮和托轮轴的应力分布情况，宜对其进行接触分析。对某 10000t/d 生产线回转窑的托轮与托轮轴之间的过盈配合接触进行有限元分析，不考虑温度场对其力学特征的影响，得出托轮与托轮轴的接触应力。

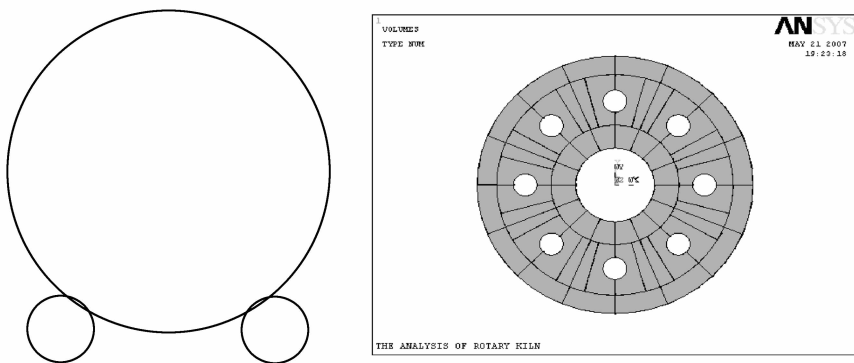


图 11-1　滚圈、托轮位置关系及几何建模

（1）几何结构

滚圈的几何参数：宽度为 0.65m，内径 $R_1=2.1$m，外径 $R_2=2.33$m。

拖轮的几何参数：厚度为 0.78m，半径 $R_{1T}=0.7$m，$R_{2T}=0.6$m，$R_3=0.455$m，$R_4=0.325$m，$R_5=0.2$m，$R_6=0.06$m，$R_7=0.200184$m。

轴承高度取 $4B_1/3$m。

（2）材料常数　弹性模量 $E=210$MPa；泊松比为 0.3；比重为 76440N/m^3；密度为 7800kg/m^3。

命令流如下：

1）参数定义。

```
/clear
```

```
/title,the analysis of rotary kiln             ! 定义标题
/filname,rotarykiln
*afun,deg                                      ! 指定角度单位
*set,br,0.65                                   ! 滚圈宽度
*set,r1,2.1                                    ! 滚圈内径
*set,r2,2.33                                   ! 滚圈外径
*set,b1,0.78                                   ! 拖轮宽度
*set,b2,0.312                                  ! 拖轮腹板宽度
*set,r1t,0.7                                   ! 拖轮尺寸
*set,r2t,0.6
*set,r3,0.455
*set,r4,0.325
*set,r5,0.2
*set,r6,0.06
*set,r7,0.200184                               ! 轴承半径
*set,q,3615992                                 ! 载荷量
*set,pi,3.1415926
*set,rc,2.215
*set,kval,0.876376                             ! 常数k的值
*set,bval,54                                   ! 角度值
/prep7                                         ! 进入前处理器及定义材料常数
! 指定材料常数
et,1,solid95                                   ! 定义单元类型
et,2,plane42
mp,ex,1,210e9                                  ! 定义材料参数
mp,nuxy,1,0.3
mp,dens,1,7800
```

2）滚圈、托轮及轴承的实体建模。

```
! 创建托轮并划分网格
cyl4,,,r2t,0,r1t,45/2,b1/2                     ! 1/16拖轮外圈
cyl4,,,r5,0,r4,45/2,b1/2                       ! 1/16拖轮外圈
cyl4,,,r4,0,r2t,45/3,b2/2
cyl4,,,r4,45/3,r2t,45/2,b1/2
wpoffs,r3
cyl4,,,,,r6,360,b1
vsbv,3,5
wpcsys,-1,0
vglue,all
lesize,14,,,6
lesize,4,,,6
lesize,56,,,2
lesize,55,,,2
lesize,71,,,4
lesize,67,,,4
```

```
lesize,15,,,3
lesize,13,,,3
lesize,25,,,6
lesize,37,,,6
lesize,3,,,2
lesize,1,,,2
lesize,75,,,2
lesize,74,,,2
lesize,52,,,7
lesize,51,,,7
lsel,s,line,,37
lsel,a,line,,67,71,4
lccat,all
lsel,s,line,,51,52
lccat,all
lsel,s,line,,56,71,15
lccat,all
lsel,s,line,,55,67,12
lccat,all
mshkey,1
mshape,0
asel,s,loc,z,0
type,2
amesh,all
alls
vsel,u,volu,,8
lesize,24,,,5
extopt,aclear,1
type,1
vsweep,all
vsel,s,volu,,8
extopt,aclear,1
extopt,esize,2
vsweep,all
allsel,all
nummrg,all
numcmp,all
lsel,s,lccat
ldel,all
vsymm,y,all
csys,1
vgen,8,all,,,,45
allsel,all
nummrg,all
numcmp,all
```

```
! 创建轴承并划分网格
cyl4,,,,,r7,90,(2*b1)/3                            ! 1/4 轴承
lsel,s,loc,z,(2*b1)/3
lsel,r,loc,x,r7
lesize,all,,,6
asel,s,loc,z,(2*b1)/3
type,2
amesh,all
type,1
lsel,s,loc,x,0
lesize,all,,,8
vsel,s,loc,x,0,r7
extopt,aclear,1
vsweep,all
csys,0
vsymm,y,all
vsymm,x,all
alls
nummrg,all
numcmp,all
! 创建滚圈并划分网格
csys
wpoffs,-(r2+r1t)*cos(60),(r2+r1t)*sin(60)
cyl4,,,r1,-90,r2,90,br/2                           ! 生成 1/4
cswpla,11,1                                        ! 在滚圈中心处建立 11
csys,11
vsel,s,loc,x,0,r2
wprota,,90
wprota,,,-30
vsbw,all
wprota,,,66
vsbw,all
csys,11
lsel,s,loc,x,,r1                                   ! -90°到-30°之间弧线划分
lsel,r,loc,y,-89,-31
lesize,all,,,20
lsel,s,loc,x,0,r1                                  ! -30°到36°之间弧线划分
lsel,r,loc,y,-29,35
lesize,all,,,20
lsel,s,loc,x,0,r1                                  ! 36°到90°之间弧线划分
lsel,r,loc,y,37,89
lesize,all,,,10
lsel,s,loc,x,r1+0.001,r2-0.001                     ! 径向线划分
lsel,r,loc,y,90
lesize,all,,,3
```

```
lsel,s,loc,z,0.001,br/2-0.001          ! 厚度方向线划分
lsel,r,loc,y,90
lesize,all,,,5
mshkey,1                               ! 映射划分网格(见图 11-2)
mshape,0                               ! 六面体单元
type,2
asel,s,loc,x,0,r2
asel,r,loc,z,0
amesh,all
extopt,aclear,1                        ! 扫掠选项
type,1
vsweep,all
allsel,all
```

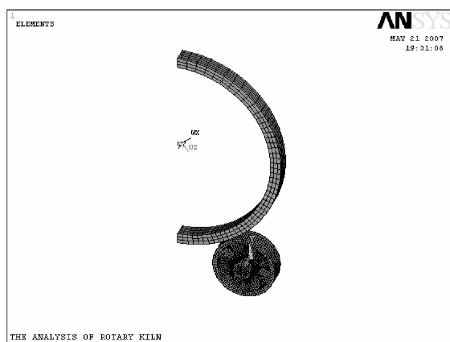


图 11-2　划分网格结果

3）接触单元生成。

```
et,3,170
et,4,174
et,5,174
mp,mu,2,0                              ! 指定轴承光滑
mp,mu,3,0.2                            ! 摩擦系数
keyopt,4,9,2
keyopt,5,5,1
type,3                                 ! 指定创建的单元类型
r,3
real,3
mat,2                                  ! 指定材料号
csys,1
asel,s,loc,x,r7                        ! 选择半径为 r7 的面
nsla,s,1                               ! 选择面上的点
esln,s,0                               ! 选择与点相关的单元
esurf
type,4                                 ! 创建轴承接触面单元
real,3
mat,2
```

```
asel,s,loc,x,r5
nsla,s,1
esln,s,0
esurf
allsel
type,3                                  ! 创建拖轮目标面单元
mat,3
r,4
real,4
csys,1
asel,s,loc,x,r1t
asel,r,loc,y,90,150
nsla,s,1
esln,s,0
esurf
type,5                                  ! 创建滚圈接触面单元
mat,3
real,4
csys,11
vsel,s,loc,x,0,r2
aslv,s
asel,r,loc,x,r2
asel,r,loc,y,-89,-31
nsla,s,1
esln,s,0
esurf
allsel
numcmp,node
numcmp,elem
```

4）施加约束条件。

```
finish
/solu
csys,1
asel,s,loc,z,0                          ! 选择 z=0 的平面
da,all,symm                             ! 施加对称约束
asel,s,loc,z,(2*b1)/3                   ! 选择轴承上表面
da,all,ux                               ! 施加位移约束
da,all,uy
wpcsys,,11
cswpla,12                               ! 创建 12 号卡氏坐标系
csys,12
asel,s,loc,x,0                          ! 选择 x=0 的平面
da,all,symm
```

```
allsel,all
```

5）施加载荷。模型的载荷包括对象本身的重力和筒体对滚圈的压力 p，$q=3615992$N。

```
wpcsys,,12
wprota,-90                                  ! 旋转工作坐标系
cswpla,13                                   ! 创建 13 号坐标系
! 设置余弦载荷函数
*set,_fncname,'pfun'
*dim,_fnc_c1,,1
*dim,_fnc_c2,,1
*dim,_fnc_c3,,1
*set,_fnc_c1(1), 3615992
*set, _fnc_c2(1), 0.876376
*set, _fnc_c3(1), 2.215
*set, _fnccsys, 13
*dim,%_fncname%, table, 6, 13, 1,,,,%_fnccsys%
*set,%_fncname%(0,0,1), 0.0, -999
*set,%_fncname%(2,0,1), 0.0
*set,%_fncname%(3,0,1),%_fnc_c1(1)%
*set,%_fncname%(4,0,1),%_fnc_c2(1)%
*set,%_fncname%(5,0,1),%_fnc_c3(1)%
*set,%_fncname%(6,0,1), 0.0
*set,%_fncname%(0,1,1), 1.0, -1, 0, 2, 0, 0, 2
*set,%_fncname%(0,2,1), 0.0, -2, 0, 1, 2, 17, -1
*set,%_fncname%(0,3,1),    0, -1, 0, 2, 0, 0, 3
*set,%_fncname%(0,4,1), 0.0, -3, 0, 1, 3, 17, -1
*set,%_fncname%(0,5,1), 0.0, -1, 0, 1, -2, 1, -3
*set,%_fncname%(0,6,1), 0.0, -1, 16, 1, -1, 0, 0
*set,%_fncname%(0,7,1), 0.0, -2, 0, 1, 2, 4, -1
*set,%_fncname%(0,8,1), 0.0, -1, 0, 1, 18, 1, -2
*set,%_fncname%(0,9,1), 0.0, -2, 0, 1, 17, 3, -1
*set,%_fncname%(0,10,1), 0.0, -1, 0, 3.14159265358979310, 0, 0, 19
*set,%_fncname%(0,11,1), 0.0, -3, 0, 1, -1, 3, 19
*set,%_fncname%(0,12,1), 0.0, -1, 0, 1, -2, 4, -3
*set,%_fncname%(0,13,1), 0.0, 99, 0, 1, -1, 0, 0
asel, s, area,, 386, 396, 10                ! 选择加载的面
sfa, all,, press,%pfun%                     ! 施加载荷
```

6）求解。

```
antype,static                               ! 指定求解类型
acel,,9.8                                   ! 重力加速度
outres,basic,all                            ! 指定输出
autots,on                                   ! 打开自动时间步
nropt,full                                  ! 打开全牛顿-拉普森选项
nsubst,8,16                                 ! 指定载荷步
```

```
allsel,all                                  ! 选择所有物体
/status,solu
solve                                       ! 求解模型
save                                        ! 保持求解结果
```

7）后处理，结构变形云图。

```
vsel,s,volu,,69,70                          ! 显示滚圈变形云图
vsel,a,volu,,72
eslv
pldisp,1
vsel,inve                                   ! 显示拖轮变形云图
eslv
pldisp,1
! 显示滚圈应力云图,可以看到滚圈的最大位移发生在上部,达到5.759mm。
```

8)结构的应力云图。

```
vsel,s,volu,,69,70
vsel,a,volu,,72
eslv
plnsol,s,eqv,0,1.0
/view,1,1,1,1
vsel,inve                                   ! 显示拖轮应力云图
vsel,u,volu,,65,68
eslv
plnsol,s,eqv,0,1.0
/view,1,1,1,1
```

11.2.2 实例2—压力容器的应力分析设计

某高压容器设计压力 $P=16\text{MPa}$，设计温度 $T=200℃$，材料为16MnR。筒体内径$R_1=775\text{mm}$，壁厚 $t_1=100\text{mm}$；封头内径 $R_2=800\text{mm}$，厚度 $t_2=48\text{mm}$，筒体削边长度 $L=95\text{mm}$。试对该压力容器筒体与封头的连接区域进行应力分析。

由于主要讨论封头与筒体过渡区域的应力状况，忽略封头上的其他结构如开孔接管等，建立如图11-3所示的有限元力学模型，其中筒体长度远远大于边缘应力的衰减长度，此处取筒体长度 $L_c=1200\text{mm}$。有限元计算采用Plane82单元，并设定轴对称选项。筒体下端各节点约束 轴向位移，球壳对称面上各节点约束水平方向位移，内壁施加均匀压力面载荷。

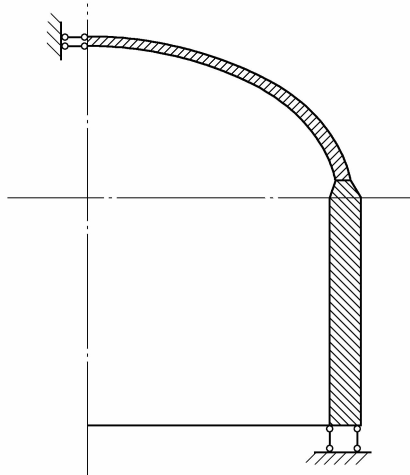


图11-3 有限元分析模型

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex11-2
/title,vortex
/units,si
```

```
r1 = 775                                        ! 参数设定
t1 = 100
r2 = 800
t2 = 48
l = 95
lc = 1200
p = 16
e = 2e5
nu = 0.3
nt = 5                                          ! 厚度方向剖分数
ns = 30                                         ! 球壳径向剖分数
nc = 30                                         ! 筒体轴向剖分数
nl = 5                                          ! 过渡段剖分数
ra = 0.6                                        ! 剖分比例
/prep7                                          ! 前处理
et,1,82
keyopt,1,3,1
mp,ex,1,e
mp,nuxy,1,nu
cyl4,,,r2,0,r2 + t2,90
blc4,r1,0,t1, -lc +l
wprot,, -90
wpoff,,,l
asel,s,loc,y,0,r2 + t2
asbw,all
asel,s,loc,y,0,l
adele,all,,,1
k1 = kp(r1,0,0)
k2 = kp(r1 + t1,0,0)
ksel,s,loc,y,l
*get,k3,kp,,num,min
*get,k4,kp,,num,max
alls
a,k1,k2,k3,k4
! 划分网格
lsel,s,loc,y, -lc +l
lsel,a,loc,y,0
lsel,a,loc,y,l
lsel,a,loc,x,0
lesize,all,,,nt,,,,,1
lsel,s,length,,lc -l
lsel,r,loc,x,r1
lesize,all,,,nc,1/ra,,,,1
```

```
lsel,s,length,,lc - l
lsel,r,loc,x,r1 + t1
lesize,all,,,nc,ra,,,,1
lsel,s,radius,,r2
lsel,a,radius,,r2 + t2
lesize,all,,,ns,ra,,,,1
lsel,s,loc,y,0,l
lsel,u,loc,y,0
lsel,u,loc,y,l
lesize,all,,,nl,,,,,1
alls
amesh,all
finish
/solu                                    ! 求解
nsel,s,loc,y, - lc + l
d,all,uy
nsel,s,loc,x,0
d,all,ux
lsel,s,line,,3,8,5
lsel,a,line,,10
nsll,s,1
sf,all,pres,p
alls
solve
finish
/post1                                   ! 后处理
plnsol,s,int,0,1                         ! 显示应力云图(见图 11-4)
finish
```

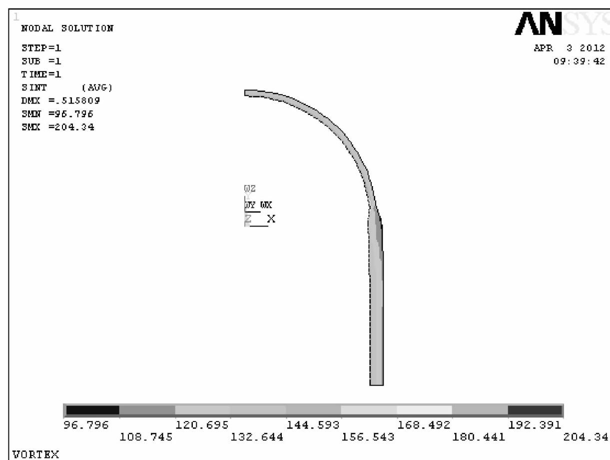


图 11-4　应力分布

11.2.3　实例 3—利用 ANSYS 进行断裂分析

某工件由两种材料组成：表面镀层为铝，基底为钢。本实例对表面镀层的剥离过程进行分析，实现剥离过程的模拟。裂纹扩展是通过接触单元生死功能实现的。基层和镀层由接触单元连接，然后通过断裂判断准则确定要杀死的失效接触单元。基体材料的弹性模量为 210e3MPa，泊松比为 0.3，镀层的弹性模量和泊松比分别为 70e3MPa 和 0.33。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex11 -3
/prep7
et,1,plane182
keyopt,1,1,2
keyopt,1,3,1
keyopt,1,4,0
keyopt,1,6,0
keyopt,1,10,0
rect,0,100,0,100                    ! 建立模型
rect,0,100,100,110
lesi,1,,,10
lesi,2,,,10
esha,2
mptemp,,,,,,,,                      ! 材料性能参数
mptemp,1,0
mpdata,ex,1,,210e3
mpdata,prxy,1,,0.3
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,ex,2,,70 e3
mpdata,prxy,2,,0.33
amesh,1
lesi,5,,,10
lesi,6,,,2
mat,2
amesh,2
lsel,s,,,3
nsll,s,1
cm,c1,node
lsel,s,,,5
nsll,s,1
cm,t1,node
nsel,s,loc,x
d,all,ux
nsel,s,loc,y
d,all,uy
```

```
d,all,ux
mp,mu,3,0
/com,contact pair creation - start                    ! 建立接触
cm,_nodecm,node
cm,_elemcm,elem
cm,_linecm,line
cm,_areacm,area
/gsav,cwz,gsav,,temp
mp,mu,3,0
mat,3
r,3
real,3
et,2,169                                              ! 选择单元
et,3,172
r,3,,,100,0.1,0,
rmore,,,1.0e20,0.0,1.0,
rmore,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
rmore,0,0.5,1.0,0.0,
keyopt,3,2,0
keyopt,3,3,0
keyopt,3,4,0
keyopt,3,5,0
keyopt,3,7,0
keyopt,3,8,0
keyopt,3,9,0
keyopt,3,10,0
keyopt,3,11,0
keyopt,3,12,5
nsel,s,,,t1                                           ! 产生目标面
cm,_target,node
type,2
esln,s,0
esurf,all
cmsel,s,_elemcm
nsel,s,,,c1                                           ! 产生接触面
cm,_contact,node
type,3
esln,s,0
esurf,all
allsel
esel,all
esel,s,type,,2
esel,a,type,,3
esel,r,real,,3
/psymb,esys,1
```

```
/pnum,type,1
/num,1
eplot
esel,all
esel,s,type,,2
esel,a,type,,3
esel,r,real,,3
cmsel,a,_nodecm
cmdel,_nodecm
cmsel,a,_elemcm
cmdel,_elemcm
cmsel,s,_linecm
cmdel,_linecm
cmsel,s,_areacm
cmdel,_areacm
/gres,cwz,gsav
cmdel,_target
cmdel,_contact
/com,contact pair creation - end
lsel,s,,,7
nsll,s,1
cm,s1,node
sfgrad,pres,0,x,0,-0.1,                         ！施加表面载荷
sf,all,pres,-0.1
nsel,all
esel,all
/solu
anty,,rest
time,1.1
ekill,140
solve
/post1
plns,s,1
/solu
anty,,rest
time,1.4
ekill,140
ekill,139
ekill,138
ekill,137
solve
/post1
plns,s,1
plnsol,s,int,0,1                                ！显示应力云图(见图 11-5)
finish
```

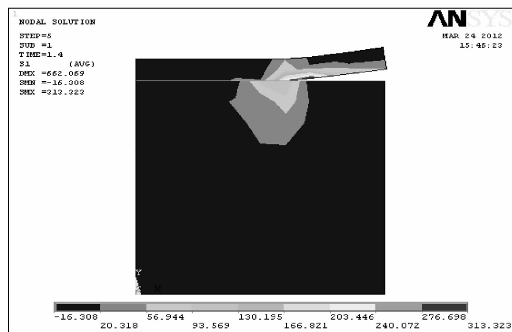


图 11-5　裂纹周边应力分布

裂纹三维扩展模拟，三维 J 积分相对于二维 J 积分的难点在于：裂纹尖端附近单元没有 KSCON 这样的命令来直接生成，需要自己处理三维 J 积分裂纹尖端附近单元生成的命令流。下面是这段命令流的使用说明：先划分网格，然后把裂纹尖端对应的那个节点定义为部件，名称为 CRACKTIP，然后输入如下部分命令流，裂纹尖端附近第一行单元便调整成奇异单元。之后的加载和 J 积分部分无特别之处。

```
/filname,ex11 - 3 - 1
/prep7
smrt,off
/title,vm143,fracture mechanics stress intensity  - crack in a finite width plate
c * * * brown and srawley,astm special technical publication no. 410.
/com,  crack in 3 - dimensions using solid45 and solid95
antype,static                                  ! 静态分析
et,1,solid45
et,2,solid45                                   ! 裂纹发源处的单元
et,3,solid95                                   ! 裂纹发源处的单元
fract
mp,ex,1,3e7
mp,nuxy,1,.3
csys,1                                         ! 圆柱坐标系
n,1
ngen,9,20,1
n,11,.8
n,171,.8,180
fill,11,171,7,31,20
csys,0                                         ! 笛卡儿坐标系
fill,1,11,9,2,1,9,20,3
n,15,4
n,75,4,5
fill,15,75,2,35,20
n,155,-1,5
fill,75,155,3,95,20
```

```
n,172,-1
fill,155,172,5,177,-1,,,.15
fill,11,15,3,,,7,20,3
ngen,2,200,1,177,,,,.25
e,2,22,1,1,202,222,201,201
egen,8,20,-1
e,2,3,23,22,202,203,223,222
egen,8,20,-1
egen,9,1,-8
egen,5,1,73,78
e,171,151,173,172,371,351,373,372
e,151,131,174,173,351,331,374,373
e,131,132,175,174,331,332,375,374
egen,3,1,-1
e,134,135,155,177,334,335,355,377
type,2
emodif,1                                    ! 修改单元
type,2
*repeat,8,1
nummrg,node                                 ! 合并节点
nsel,s,loc,x,0
nsel,r,loc,y,0
cm,cracktip,node
/nerr,0                                     ! 出错提示
Printout
/nopr
nsel,all
*get,n,node,,num,max                        ! 最大节点数
cmsel,s,cracktip                            ! 选择上部节点
esln
*get,elmax,elem,,num,max                    ! 最大单元数
*do,iel,1,elmax
  elmi=iel
  *if,elmi,le,0,exit
  *get,eltype,elem,elmi,attr,type
  *if,eltype,ne,arg1,cycle
  n3=nelem(elmi,3)
  *if,nsel(n3),le,0,cycle
  n7=nelem(elmi,7)
  *if,nsel(n7),le,0,cycle
  n1=nelem(elmi,1)
  n2=nelem(elmi,2)
  n5=nelem(elmi,5)
```

```
    n6 = nelem(elmi,6)
    x3 = 0.75 * nx(n3)
    y3 = 0.75 * ny(n3)
    z3 = 0.75 * nz(n3)
    x = 0.25 * nx(n2) + x3
    y = 0.25 * ny(n2) + y3
    z = 0.25 * nz(n2) + z3
    n = n + 1
    n10 = n
    n,n10,x,y,z
    x = 0.25 * nx(n1) + x3
    y = 0.25 * ny(n1) + y3
    z = 0.25 * nz(n1) + z3
    n = n + 1
    n12 = n
    n,n12,x,y,z
    x7 = 0.75 * nx(n7)
    y7 = 0.75 * ny(n7)
    z7 = 0.75 * nz(n7)
    x = 0.25 * nx(n6) + x7
    y = 0.25 * ny(n6) + y7
    z = 0.25 * nz(n6) + z7
    n = n + 1
    n14 = n
    n,n14,x,y,z
    x = 0.25 * nx(n5) + x7
    y = 0.25 * ny(n5) + y7
    z = 0.25 * nz(n5) + z7
    n = n + 1
    n16 = n
    n,n16,x,y,z
    n4 = n3
    n8 = n7
    nsel,all
    type,3
    en,elmi,n1,n2,n3,n4,n5,n6,n7,n8                    ! 重新定义单元
    emore,0,n10,0,n12,0,n14,0,n16
    emore,
  *enddo
cmsel,u,cracktip
nummrg,node                                            ! 合并内节点
nsel,all                                               ! 选择所有单元
esel,all
```

```
/gopr
*end
nerr,defa
Printout
/output
outpr,,all
outpr,veng,all
evaluation
nsel,s,loc,x,-1
dsym,symm,x
nsel,s,loc,x,0,4
nsel,r,loc,y,0
dsym,symm,y
nsel,all
d,all,uz
nsel,s,loc,y,5
sf,all,pres,-.5641895
nsel,all
esel,all
finish
/output,scratch
/solu
solve
finish
/output
/post1
etable,sene,sene
etable,volu,volu
path,ki1,3,,48
ppath,1,1
ppath,2,406
ppath,3,162
kcalc,,,1
*get,ki1,kcalc,,k,1
*create,jin1
stinfc
sexp,w,sene,volu,1,-1
path,jint,4,50,48
ppath,1,arg1
ppath,2,arg2
ppath,3,arg3
ppath,4,arg4
pdef,w,etab,w
```

```
pcalc,intg,j,w,yg
*get,ja,path,,last,j
pdef,clear
pvect,norm,nx,ny,nz
pdef,intr,sx,sx
pdef,intr,sy,sy
pdef,intr,sxy,sxy
pcalc,mult,tx,sx,nx
pcalc,mult,c1,sxy,ny
pcalc,add,tx,tx,c1
pcalc,mult,ty,sxy,nx
pcalc,mult,c1,sy,ny
pcalc,add,ty,ty,c1
*get,dx,path,,last,s
dx = dx/100
pcalc,add,xg,xg,,,,-dx/2
pdef,intr,ux1,ux
pdef,intr,uy1,uy
pcalc,add,xg,xg,,,,dx
pdef,intr,ux2,ux
pdef,intr,uy2,uy
pcalc,add,xg,xg,,,,-dx/2
c = (1/dx)
pcalc,add,c1,ux2,ux1,c,-c
pcalc,add,c2,uy2,uy1,c,-c
pcalc,mult,c1,tx,c1
pcalc,mult,c2,ty,c2
pcalc,add,c1,c1,c2
pcalc,intg,j,c1,s
*get,jb,path,,last,j
jint = 2*(ja-jb)
pdef,clear
*end
con1 = 30e6/(1-(0.3*0.3))
*ulib,jin1
*use,stinfc,4,45,125,164
ki2 = sqrt(con1*jint)
*status,ki1
*status,ki2
*dim,label,char,2,2
*dim,value,,2,3
label(1,1) = 'by disp ','by j -'
label(1,2) = 'extrp ','int'
```

```
*vfill,value(1,1),data,1.0249,1.0249
*vfill,value(1,2),data,ki1,ki2
*vfill,value(1,3),data,abs(ki1/1.0249),abs(ki2/1.0249)
save,table_1
finish
/post1
plns,s,1
plnsol,s,int,0,1                                    ! 显示应力云图(见图 11-6)
finish
```

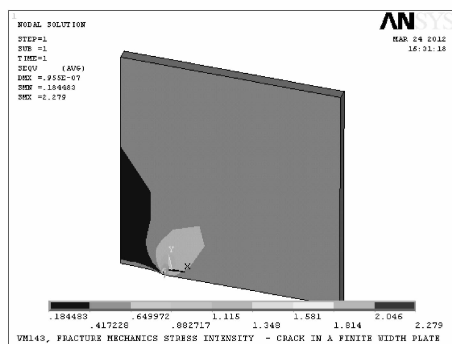


图 11-6　三维裂纹扩展

11.2.4　实例 4—点焊接头的失效分析

点焊是焊件在接头处接触面的个别点上被焊接起来(见图 11-7)。点焊要求金属要有较好的塑性。板的尺寸为 80mm×40mm×1mm，重合尺寸为 40mm。一块平板的一端被完全固定，另一块平板的一端给定 40mm 的位移载荷。两块平板之间有点焊连接，点焊在法向和切向方向的极限失效力均为 100N。

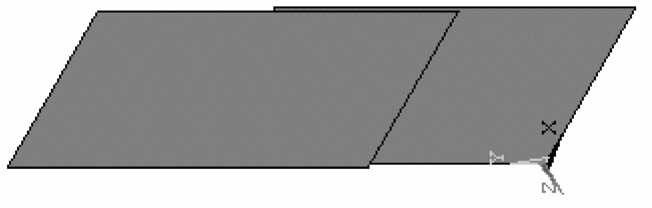


图 11-7　点焊接头示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex11-4,1
/prep7
et,1,shell163,12
et,2,shell163,12
r,1,,5,1.0
r,2,,5,1.0
```

```
mp,ex,1,210.0
mp,nuxy,1,0.29
mp,dens,1,7.85e-6
tb,bkin,1
tbdata,1,0.80
tbdata,2,21.0
rectng,0,40,0,80
wpoff,0,40,1.05
rect,0,40,0,80
wpcsys,,0
wpstyl
/view,,1,1,1
mshape,0,2d
mshkey,1
esize,10.0
type,1
real,1
amesh,1
type,2
real,2
amesh,2
/auto
eplot
edpart,create
eddamp,all,,0.01
eddamp,1,,5.0e-2
eddamp,2,,5.0e-2
edcgen,ag
finish
/solu
time,1.0
edrst,25
edhtime,500
edenergy,1,1,1,1
edout,glstat
edout,matsum
nsel,s,loc,y,35,85
cm,ntrack,node
edhist,ntrack
nsel,s,loc,y,0
d,all,ux,0.0,,,,uy,uz
d,all,rotx,0.0,,,,roty,rotz
nsel,s,loc,y,120
```

```
d,all,ux,0.0,,,,uz
d,all,rotx,,,,roty,rotz
cm,npull,node
nsel,all
*dim,etime,,2,0
etime(1)=0.0,1.01
*dim,ydisp,,2,0
ydisp(1)=0.0,40.0
n1=node(20.0,60.0,1.05)
n2=node(20.0,60.0,0.0)
eplot
save
finish
/eof
/prep7
edweld,add,1,78,37,100,100,2,2,
finish
/solu
edcurve,add,1,etime,ydisp
edcurve,plot,1
edload,add,uy,0,npull,'','',0,1,,,,
edload,list
edpl,1,
save
/status,solu
solve
finish
/post1
set,last
plnsol,s,eqv,0,1                                    ! 接头的应力分布(见图 11-8)
finish
```

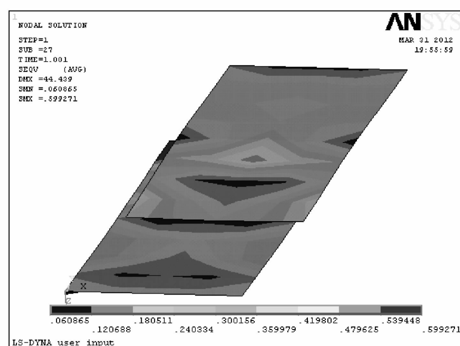


图 11-8　接头的应力分布

11.2.5 实例 5—水压疲劳试验有限元分析

某压力容器平板封头与筒体连接的结构如图 11-9 所示，容器的最高工作压力为 2MPa，最低工作压力为 0MPa，水压实验压力为 2.88MPa，容器材料的弹性模量为 2e5MPa，泊松比为 0.3，温度为 50℃，水压实验的最高、最低的循环次数为 20000 次与 5 次。对连接头进行疲劳分析。

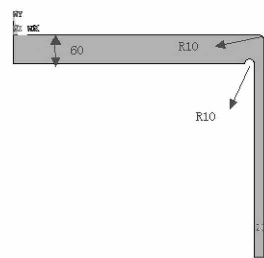


图 11-9 封头与筒体连接示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex11 -5,1
/units,si
/title,Fatigue analysis of cylinder with flat head
! 参数设定
Di =1000                                  ! 筒体内径
t =20                                     ! 筒体厚度
hc = nint(4 * sqrt(Di/2 * t)/10) * 10     ! 模型中筒体长度
tp =60                                    ! 平板封头厚度
r1 =10                                    ! 平板封头外侧过渡圆弧半径
r2 =10                                    ! 平板封头内侧应力释放槽圆弧半径
exx =2e5                                  ! 材料弹性模量
mu =0.3                                   ! 材料泊松比
p1 =2                                     ! 最高工作压力
p3 =2.88                                  ! 水压试验压力
n1 =2e4                                   ! 最高/最低压力循环次数
n2 =5                                     ! 水压试验次数
/prep7                                    ! 前处理
et,1,82                                   ! 设定单元类型
keyopt,1,3,1                              ! 设定轴对称选项
mp,ex,1,exx                               ! 定义材料弹性模量
mp,nuxy,1,mu                              ! 定义材料泊松比
! 建立模型
k,1,0,0                                   ! 定义关键点
k,2,Di/2 +t,,
k,3,Di/2 +t, -(tp +hc)
k,4,Di/2, -(tp +hc)
k,5,Di/2, -tp
k,6,Di/2 -r2, -tp                         ! 定义应力释放槽圆弧中心关键点
k,7,0, -tp
l,1,2                                     ! 生成线
l,2,3
l,3,4
l,4,5
l,5,7
```

```
l,7,1
LFILLT,1,2,r1                    ! 生成外侧过渡圆弧
al,all                           ! 生成子午面
CYL4,kx(6),ky(6),r2,180          ! 生成应力释放槽面域
ASBA,1,2                         ! 面相减
wprot,,,90                       ! 旋转工作平面
wpoff,,,kx(6) -3 * r2            ! 移动工作平面
asbw,all                         ! 用工作平面切割子午面
wprot,,90                        ! 旋转工作平面
wpoff,,,tp + r2                  ! 移动工作平面
asbw,all                         ! 用工作平面切割子午面
esize,5                          ! 设定单元尺寸
MSHKEY,1                         ! 设定映射剖分
amesh,1                          ! 映射剖分面 1
amesh,3                          ! 映射剖分面 3
esize,2                          ! 设定单元尺寸
MSHKEY,0                         ! 设定自由剖分
amesh,4                          ! 自由剖分面 4
finish                           ! 退出前处理
! 求解
/solu                            ! 筒体端部施加轴向约束
dl,3,,uy                         ! 筒体端部施加轴向约束
dl,6,,symm                       ! 平板封头对称面施加对称约束
time,1                           ! 载荷步 1
lsel,s,,,8                       ! 选择内表面各线段
lsel,a,,,11,13
lsel,a,,,15
cm,lcom1,line                    ! 生成内表面线组件
sfl,all,pres,p1,                 ! 内表面施加内压
alls                             ! 全选
solve                            ! 求解
finish                           ! 退出求解器
! 后处理
/post1                           ! 进入后处理
ftsize,1,2,2,                    ! 设定疲劳评定的位置数、事件数及载荷数
fp,1,1e1,2e1,5e1,1e2,2e2,5e2     ! 根据疲劳曲线输入 s-n 数据
fp,7,1e3,2e3,5e3,1e4,2e4,5e4
fp,13,1e5,2e5,5e5,1e6,,
fp,19,,
fp,21,4000,2828,1897,1414,1069,724
fp,27,572,441,331,262,214,159
fp,33,138,114,93.1,86.2,,
fp,39,,
```

```
！水压试验循环
fs,4760,1,1,1,0,0,0,0,0,0          ！储存节点 4760 对应其第一载荷的应力
set,1,last                         ！读入第一载荷步数据
fsnode,4760,1,2                    ！储存节点 4760 对应其第二载荷的应力
fe,1,n2,p3/p1                      ！设定事件循环次数及载荷比例系数
！最高/最低压力循环
fs,4760,2,1,1,0,0,0,0,0,0          ！储存节点 4760 对应其第一载荷的应力
set,1,last                         ！读入第一载荷步数据
fsnode,4760,2,2                    ！储存节点 4760 对应其第二载荷的应力
fe,2,n1,1,                         ！设定事件循环次数及载荷比例系数
ftcalc,1                           ！进行疲劳计算(并记录使用系数)
/post1
plnsol,s,eqv,0,1                   ！接头的应力分布(见图 11-10)
```

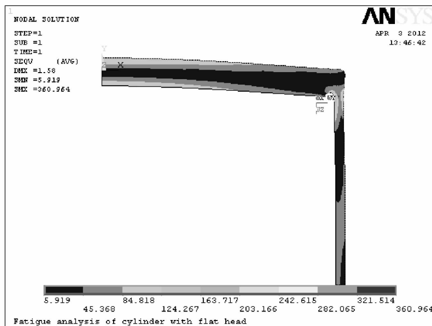


图 11-10 接头的应力分布

11.3 本章总结

本章主要介绍结构疲劳分析的定义和基于 ANSYS 软件的疲劳分析方面的基础知识，通过对实例的具体分析求解，使读者熟悉疲劳问题分析的基本方法和步骤，并为读者提供典型的疲劳问题的求解思路。

11.4 练习题

1）疲劳的定义是什么？

2）ANSYS 软件中如何进行疲劳分析？步骤是什么？

3）2-D 平面模型的疲劳分析，图 11-11 所示为一个带有小圆孔的板件，一端固定，一端承受 0～31kPa 的压载，试计算指定位置处的疲劳寿命使用系数。已知材料的特性曲线如图 11-12 所示。弹性模量 $E=2\times10^{11}$Pa；泊松比 $\nu=0.3$。

4）断裂分析(J 积分与应力强度因子)，图 11-13 所示为一个等厚度空心圆盘，厚度 4mm，内径 $r=10+\Delta$，$\Delta=22$mm，外径 $R=500$mm，$E=2.1\times10^{11}$Pa，$ET=6.0\times10^{9}$Pa，屈服极限 $\sigma_s=500$MPa，$\mu=0.3$，密度 $\rho=8500\text{kg/m}^3$，采用 Mises 屈服准则，裂纹初始长度为

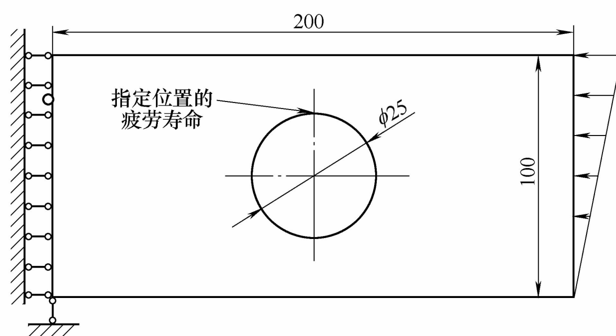


图 11-11　疲劳分析问题的模型

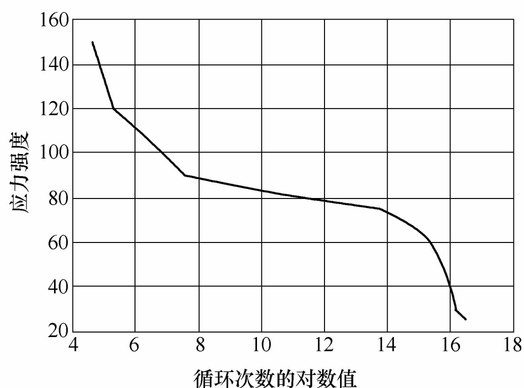


图 11-12　材料的循环次数与应力强度曲线

$a_0=2.0\text{mm}$。裂纹见图 11-13，裂纹位于 0°、90°、180°和 270°的位置，图中粗短线表示裂纹。计算载荷为均布拉力 $q=150\text{MPa}$ 时的 KI，载荷为均布拉力 $q=1200\text{MPa}$ 时的 J 积分值。当载荷为转速 $n=600\text{r/min}$ 的 KI，并计算沿裂纹尖端不同路径的积分值，与 KI 比较。求解中统一采用国际单位制，长度为 m，压力、应力与弹性模量为 Pa，密度为 kg/m^3，转速为 rad/s。

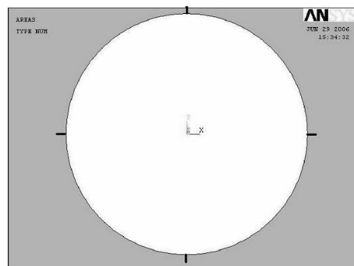


图 11-13　圆盘中心的四条裂纹

第 12 章　基于 ANSYS 软件的复合材料数值模拟

12.1　复合材料设计的基本理论与 ANSYS 有限元方法

复合材料是两种或两种以上物理或化学性质不同的材料复合在一起而形成的一种多相固体材料，具有很高的比刚度和比强度(刚度和强度与密度的比值)，因而应用相当广泛。其应用既涉及航空、航天等高科技领域，也包括游艇、风电叶片等诸多民用领域。国际标准化组织(ISO)将复合材料定义为两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料。F. L. Matthews 和 R. D. Rawlings 认为复合材料是两个或两个以上组元或相组成的混合物，并应满足下面三个条件：组元含量大于 5 %；复合材料的性能显著不同于各组元的性能；通过各种方法混合而成。

由两种或多种不同性能的组分通过宏观或微观复合在一起的新型材料，组分之间存在着明显的界面。各组分保持各自固有特性的同时可最大限度地发挥各组分的优点，赋予单一材料所不具备的优良特殊性能。因此，复合材料具有可设计性。

复合材料层合结构的设计，就是对铺层层数、铺层厚度及铺层角的设计。采用传统的等代设计(等刚度、等强度)、准网络设计等设计方法，复合材料的优异性能难以充分发挥。在复合材料结构分析中，已经广泛采用有限元数值仿真分析，其基本原理在本质上与各向同性材料相同，只是离散方法和本构矩阵不同。复合材料有限元法中的离散化是双重的，包括了对结构的离散和每一铺层的离散。这样的离散可以使铺层的力学性能、铺层方向、铺层形式直接体现在刚度矩阵中。有限元分析软件均把增强材料和基体复合在一起，讨论结构的宏观力学行为，因此可以忽略复合材料的多相性导致的微观力学行为，以每一铺层为分析单元。

复合材料结构分析包括复合材料层合板结构和复合材料夹芯结构分析。与一般各向同性材料(isotropic material)相比，复合材料的建模过程要复杂些，复合材料各层为正交各向异性材料(orthotropic material)，材料的性能与材料主轴的取向有关，因而在开始复合材料分析之前，笔者认为非常有必要对相关的单元类型及如何选择单元、建立模型、划分网格、施加载荷等基本知识有所认识。建议读者在后面的实战过程中能经常返回本章节参考相应的说明，从而加深理解，做到融会贯通。

针对复合材料结构分析，ANSYS 程序中提供了 7 种单元类型，分别是 SHELL99、SHELL91、SHELL181、SHELL190、SOLID46、SOLID186、SOLID191 单元。单元类型的选择主要依据分析类型和所需的计算结果来确定。下面详细介绍每个单元类型及其应用范围。

SHELL99 单元为 3-D 线性结构壳单元，包含 8 个节点，每个节点有 6 个自由度。该单元适用于薄到中等厚度的板和壳体结构，要求结构的宽(长)厚比大于 10(目的是使得平面应力假设能够成立)。对于宽(长)厚比小于 10 的结构则应考虑使用 SOLID46 单元建模(生成有限元模型)。SHELL99 允许多达 250 层的等厚度材料层，或者是 125 层厚度在单元面内成双线

性变化的不等厚材料层。如果材料层大于 250 层，用户可以通过设置 keyopt(2) = 3 或 4 来定义材料矩阵。

SHELL91 单元与 SHELL99 单元类似，不同之处在于它允许的复合材料最多 100 层，用户不能输入自定义的材料矩阵，另外，SHELL91 单元支持塑性、大应变等大变形情况，并可以模拟“三明治”结构。

SHELL181 单元是一种 4 节点 3-D 壳单元，每个节点有 6 个自由度。该单元具有包含大应变的完全非线性性能，最多允许 255 层复合材料，各层的信息可以通过截面相关命令输入。

SHELL190 单元是一种 4 节点 3-D 单元，每个节点有 3 个自由度。该单元具有包含大应变性能，最多允许 255 层复合材料，允许沿厚度方向的变形斜率可以不连续，各层的信息可以通过截面相关命令输入。

SOLID46 单元是 8 节点 3-D 单元 SOLID45 的一种层叠形式，每个节点有 3 个自由度，每个单元最多允许 250 层的等厚度复合材料，同样允许 125 层厚度在单元面内成双线性变化的不等厚度材料层。该单元的另一个特点是可以用几个单元叠加的方式对多于 250 层的复合材料建模并允许沿厚度方向的横向变形斜率可以不连续，而且用户可以输入自定义的本构矩阵。与 8 节点壳单元相比，SOLID46 单元的阶次要低，因此，在壳结构分析中要得到与 SHELL99 或 SHELL91 单元相同的求解结果，需要更密的网格。

SOLID186 单元是 20 节点 3-D 实体单元，每个节点有 3 个自由度。每个单元最多允许有 250 层的等厚度材料层，允许沿厚度方向的变形斜率可以不连续，支持材料的非线性行为和大变形。

SOLID191 单元是 20 节点 3-D 实体单元 SOLID195 的一种层叠形式，每个节点有 3 个自由度。每个单元最多允许有 100 层的等厚度材料层，允许沿厚度方向的变形斜率可以不连续。SHELL191 单元不支持材料的非线性行为和大变形。

一般来说，复合材料结构总是受到空间力的作用，其应力分布是三维的。因此，复合材料结构的刚强度分析一般不宜采用复合材料的板壳理论(这种理论仅考虑板壳面内的应力和横向剪应力,而忽略法向应力)。同时，对于简单的结构(如板、壳)，可以得到弹性力学的一般解，而对于大多数结构来说，则必须用数值的方法计算，其中，三维有限元分析是最常用的方法。采用 ANSYS 程序对复合材料进行刚强度分析的步骤如下：

1）建立结构的几何模型，由于复合材料分析单元一般都是六面体单元，因此，在建立几何时要特别考虑到划分网格的方便。

2）建立材料模型，根据复合材料的材料参数建立单向复合材料的材料模型，笔者所采用的是碳纤维增强复合材料，有两种建立方法。①若选择单元为各向异性单元，则根据单向复合材料的刚度矩阵或柔度矩阵建立各向异性材料模型；②若选择层合单元，则可以建立相关的材料模型，如单向复合材料则可以建立正交各向异性材料模型 。

3）选择单元类型并设置相关属性，根据结构特征和计算要求，选择不同的单元类型并设置单元属性。

4）划分网格，在建立的几何实体上进行划分网格，对于复合材料，选择六面体三维实体单元，定义单元属性，分别指定不同的材料属性，并保证材料坐标一致，运用有限元网格生成器进行划分网格。

5）定义边界条件，根据实际情况定义边界条件。

6）分析设定并提交计算，设定分析类型及一些相关参数。

7）结果后处理。

复合材料结构在进行后处理时，非常重要的一点是选择合适的并与计算时所用坐标一致的结果坐标系，如对于回转体结构，则选择计算时的柱坐标。另外，对于用各向异性单元(SOLID64)来模拟的计算结果在后处理时必须保证应力应变关系的一致，主要是在不同种复合材料层间或者同一种复合材料不同铺层方向的层之间界面的应力应变情况，ANSYS 后处理中所得到的结果不完全是正确的，应该根据法向应力联系，面内应变连续的准则来进行处理。

复合材料最重要的特征就是叠层结构，每层材料都可能由不同的正交各向异性材料构成，并且其主轴方向也有可能不同。对于叠层复合材料，纤维的方向决定了层的主方向。对于复合材料层合板结构，通常通过两种方式定义材料层的配置：①定义各层的材料性质，对于本文研究的模型来说，主要是定义复合材料层合板各层铺层角度方向；②定义表征宏观力、力矩与宏观应变、曲率之间的相互关系的本构矩阵。

12.2 ANSYS 软件在复合材料设计上的应用实例

12.2.1 实例 1—复合材料横梁的力学性能预测

复合材料横梁(见图 12-1)的力学性能预测。复合材料组分 1 的弹性模量为 2.1e5 MPa，泊松比为 0.3；组分 2 的弹性模量为 0.2e3MPa，泊松比为 0.3；组分 3 的弹性模量为 1.8e5 MPa，泊松比为 0.3。

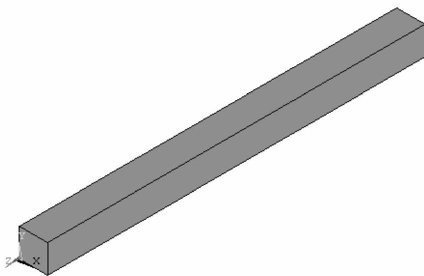


图 12-1 横梁示意图

命令流如下

```
/clear
/filname,ex12 -1,1                          ! 定义工作文件名
/title,compositebeam analysis               ! 定义工作标题
/prep7                                      ! 进入前处理
et,1,solid46                                ! 定义单元
keyopt,1,8,1
! 指定需要输出所有层的结果
! 如果采用默认设置,则仅输出顶层和底层结果
```

```
! 定义材料属性
mptemp,,,,,,,,                         ! 定义材料 1
mptemp,1,0
mpdata,ex,1,,2.1e5
mpdata,prxy,1,,0.3
mptemp,,,,,,,,                         ! 定义材料 2
mptemp,1,0
mpdata,ex,2,,0.2e3
mpdata,prxy,2,,0.3
mptemp,,,,,,,,                         ! 定义材料 3
mptemp,1,0
mpdata,ex,3,,1.8e5
mpdata,prxy,3,,0.3
*set,_rc_set,1,                        ! 定义层结构截面
r,1                                    ! 定义实常数编号
rmodif,1,1,3,0,0,0                     ! 定义层数
rmodif,1,7,0
rmodif,1,13,1,0,10,2,30,70,            ! 定义层结构
rmodif,1,19,3,60,10,
k,1,,,,                                ! 建立几何模型
k,2,,90,,
k,3,90,90,,
k,4,90,0,,
flst,2,4,3
fitem,2,1
fitem,2,2
fitem,2,3
fitem,2,4
a,p51x
voffst,1,1200,,
flst,5,4,4,orde,4                      ! 划分网格
fitem,5,2
fitem,5,4
fitem,5,6
fitem,5,8
cm,_y,line
lsel,,,,p51x
cm,_y1,line
cmsel,,_y
lesize,_y1,,,1,,,,,1
flst,5,4,4,orde,4
fitem,5,1
fitem,5,3
```

```
fitem,5,5
fitem,5,7
cm,_y,line
lsel,,,,p51x
cm,_y1,line
cmsel,,_y
lesize,_y1,,,1,,,,,1
flst,5,4,4,orde,2
fitem,5,9
fitem,5,-12
cm,_y,line
lsel,,,,p51x
cm,_y1,line
cmsel,,_y
lesize,_y1,,,50,,,,,1
type,1
mat,
real,1
esys,0
secnum,
cm,_y,volu
vsel,,,,1
cm,_y1,volu
chkmsh,'volu'
cmsel,s,_y
vsweep,_y1
cmdele,_y
cmdele,_y1
cmdele,_y2
finish
/solu
flst,2,1,5,orde,1
fitem,2,1
/go
da,p51x,all,
flst,2,1,5,orde,1
fitem,2,5
/go
sfa,p51x,1,pres,0.12
/solu                                   ! 求解
solve
plns,s,eqv                              ! 应力显示(见图 12-2)
finish
```

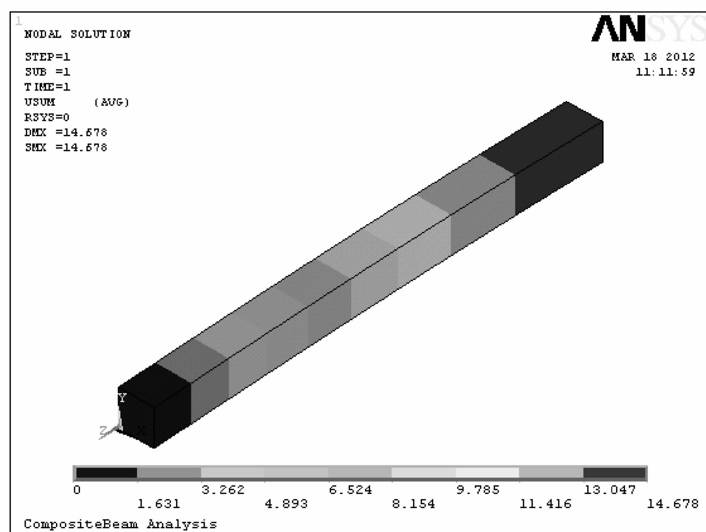


图 12-2　复合材料梁的应力分布

12.2.2　实例 2—复合材料工字梁的受力分析

如图 12-3 所示，有一长 3m 的工字梁，高度为 0.3m，上下翼缘的宽度为 0.2m。材料为 T300/5208，是 20 层对称分布叠层板，每层的厚度为 0.001m，各层的方向角分别为 0°、45°、90°、－45°、0°、0°、45°、90°、－45°和 0°，材料特性为：$E_x=181\text{GPa}$，$E_y=E_z=10.3\text{GPa}$，$G_{xy}=7.17\text{GPa}$，$G_{yz}=3.78\text{GPa}$，$\nu_{12}=0.016$。沿轴强度：$\sigma_{x+}=1500\text{MPa}$，$\sigma_{x-}=1500\text{MPa}$，$\sigma_{y+}=40\text{MPa}$，$\sigma_{y-}=246\text{MPa}$，$\sigma_{x+}=40\text{MPa}$，$\sigma_{x-}=246\text{MPa}$，$\tau_{xy}=68\text{MPa}$（＋表示受拉，－表示受压）。工字梁一端固定，另一端受集中力分别为：100N、10000N 和 100N。计算工作应力和应变、失效应力和失效层等。

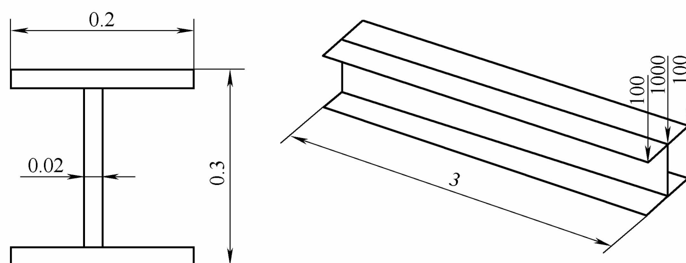


图 12-3　叠层板工字梁结构和载荷示意图

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex12-2,1                              ! 定义工作文件名
/prep7
/titile,diecenban
et,1,shell99,,,,,2,4                           ! 定义单元类型
keyopt,1,8,1
```

```
r,1,20,1,1,20                                  ! 定义实常数
rmore
rmore,1,0,0.001,1,45,0.001
rmore,1,90,0.001,1,-45,0.001
rmore,1,0,0.001,1,0,0.001
rmore,1,45,0.001,1,90,0.001,
rmore,1,-45,0.001,1,0,0.001
mp,ex,1,181e9                                  ! 定义材料特性
mp,ey,1,10.3e9
mp,ez,1,10.3e9
mp,prxy,1,0.016
mp,gxy,1,7.17e9
mp,gyz,1,3.78e9
tb,fail,1                                      ! 定义生效准则
tbtemp,,crit
tbdata,1,0,0,1
tbtemp,20
tbdata,10,1500e6
tbdata,11,-1500e6
tbdata,12,40e6
tbdata,13,-246e6
tbdata,14,40e6
tbdata,15,-246e6
tbdata,16,68e6
k,1                                            ! 定义有限元模型
k,2,3
k,3,3,0.3
k,4,0,0.3
a,1,2,3,4
k,5,0,0,0.1
k,6,3,0,0.1
k,7,3,0,-0.1
k,8,0,0,-0.1
a,5,6,7,8
k,9,0,0.3,0.1
k,10,3,0.3,0.1
k,11,3,0.3,-0.1
k,12,0,0.3,-0.1
a,9,10,11,12
aptn,1,2,3
esize,0.1
amesh,all
nummrg,node
```

```
numcmp,node
finish
  /solu
nsel,s,loc,x,0                          ! 添加约束
d,all,all
nsel,all
nsel,s,loc,x,3                          ! 添加载荷
nsel,r,loc,y,0.3
nsel,r,loc,z,0
f,all,fy,-10000
nsel,all
nsel,s,loc,x,3
nsel,r,loc,y,0.3
nsel,r,loc,z,0.1
f,all,fy,-100
nsel,all
nsel,s,loc,x,3
nsel,r,loc,y,0.3
nsel,r,loc,z,-0.1
f,all,fy,-100
nsel,all
outpr,,1
solve
finish
/post1                                  ! 观察结果
plns,s,eqv                              ! 应力显示(见图 12-4)
finish
```

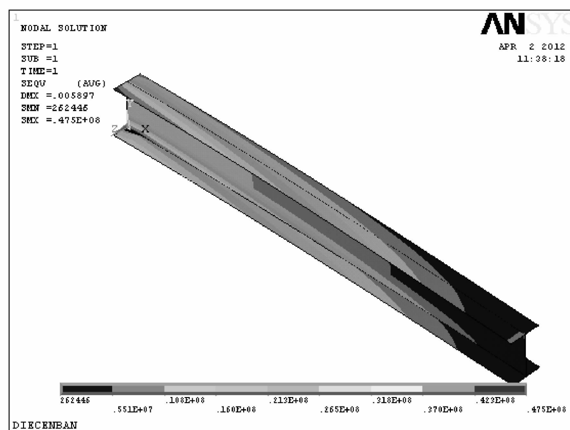


图 12-4　复合材料梁的应力分布

12.2.3 实例 3—石墨环氧层板的热分析

4 层石墨环氧反对称角铺层方板[45/－45/45/－45]，边长为 0.08m，厚度为 0.008m，加载热流于上表面中心区，面积为 0.0004m^2，大小为 100000W/m^2，材料主轴热导率 k_{xx} = 30W/(m·K)，$k_{yy}=k_{zz}$ = 1.1W/(m·K)，表面传热系数为 30W/(m^2·K)。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex12-3,1                          ! 定义工作文件名
/prep7
et,1,shell131,,,1,8                        ! 热分析用4节点分层壳单元
sectype,1,shell
mp,kxx,1,30                                ! 45°方向材料属性
mp,kyy,1,1.1
mp,kzz,1,1.1
mp,c,1,1000
mp,dens,1,1389.2
mp,kxx,2,30                                ! -45°方向材料属性
mp,kyy,2,1.1
mp,kzz,2,1.1
mp,c,2,1000
mp,dens,2,1389.2
secdata,0.001,1,45                         ! 进行各个铺层厚度、材料、方向设定
secdata,0.001,2,-45
secdata,0.001,1,45
secdata,0.001,2,-45
secdata,0.001,1,45
secdata,0.001,2,-45
secdata,0.001,1,45
secdata,0.001,2,-45
n,1,                                       ! 建模
n,17,0.08
fill,1,17
ngen,17,17,1,17,1,,0.005
e,1,2,19,18
egen,16,1,1
egen,16,17,1,16
esel,s,,,136,137
esel,a,,,120,121
sfe,all,2,hflux,,1e5                       ! 在顶面加载热流载荷
esel,all
finish
/solu
```

```
antype,static
tref,20
sfe,all,1,conv,1,30
sfe,all,1,conv,2,20
esel,u,,,136,137
esel,u,,,120,121                          ! 对未加载单元顶面、所有单元底面
sfe,all,2,conv,1,30                       ! 定义边界的空气对流换热
sfe,all,2,conv,2,20
esel,all
outres,all,all
solve
/post1
plnsol,tbot                               ! 分层显示各个层底温度分布
plnsol,te2                                ! 由底面到顶面
plnsol,te3
plnsol,te4
plnsol,te5
plnsol,te6
plnsol,te7
plnsol,te8
plnsol,ttop
path,ppp,9                                ! 定义沿 X 方向半对称轴路径
ppath,1,145
ppath,2,146
ppath,3,147
ppath,4,148
ppath,5,149
ppath,6,150
ppath,7,151
ppath,8,152
ppath,9,153
pdef,pop,ttop                             ! 显示本路径顶面温度变化(见图 12-5)
plpath,pop
plnsol,temp,,0,                           ! 温度分布(见图 12-6)
finish
```

12.2.4　实例 4—带孔复合板拉伸应力分布

建立的四层不同角度方向铺层方式示意图(0/90/90/0)见图 12-7。

材料属性为：$E_x = 1.25\text{GPa}$；$E_y = 0.3\text{GPa}$；$E_z = 0.3\text{GPa}$；$PR_{xy} = 0.25$；$PR_{yz} = 0.25$；$PR_{zx} = 0.01$；$G_{xy} = 5\text{MPa}$；$G_{yz} = 2\text{MPa}$；$G_{zx} = 5\text{MPa}$；$\rho = 1580\text{kg/m}^3$。采用三维 8 节点层状结构实体单元 solid46 建立带孔复合材料板的四分之一模型，并在空洞内部加载均布载荷。

命令流如下：

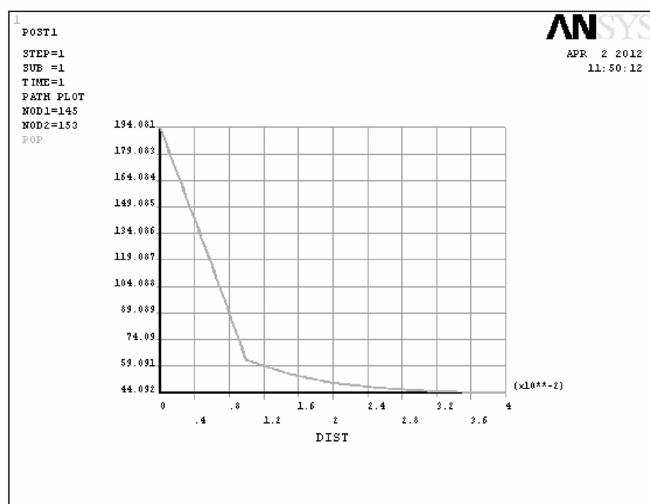


图 12-5 顶面温度变化

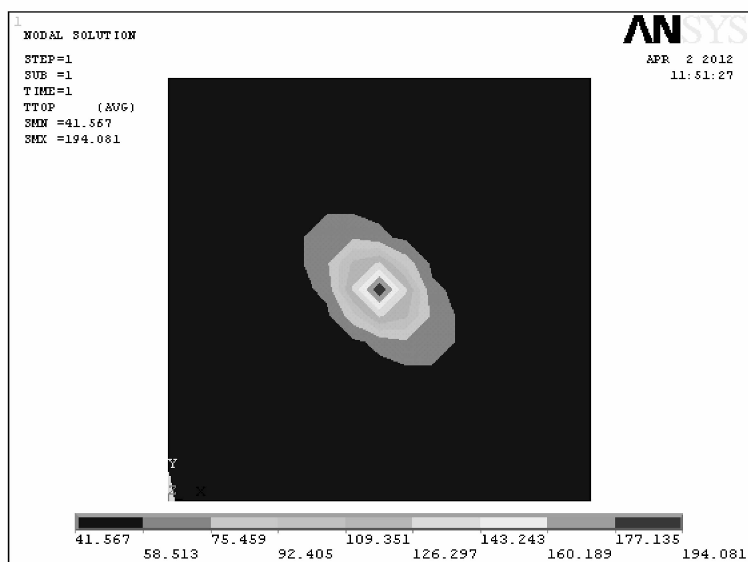
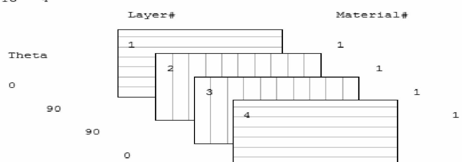


图 12-6 板的温度分布



LIST LAYERS 1 TO 4 IN REAL SET 1 FOR ELEMENT 1
TOTAL LAYERS = 4 LSYM = 1 LP1 = 0 LP2 = 0 KREF = 0

NO.	ANGLE	THICKNESS	MAT	GXY	EX
1	0.0	0.250E-01	1	0.500E+08	0.125E+10
2	90.0	0.250E-01	1	0.500E+08	0.125E+10
3	90.0	0.250E-01	1	0.500E+08	0.125E+10
4	0.0	0.250E-01	1	0.500E+08	0.125E+10

SUM OF THK 0.100

图 12-7 复合材料铺层方式示意图

```
/clear
/filname,ex12-4,1                                ! 定义工作文件名
/prep7
et,1,solid46
keyopt,1,2,0
keyopt,1,1,0
keyopt,1,3,0
keyopt,1,4,0
keyopt,1,5,0
keyopt,1,6,0
keyopt,1,8,1
keyopt,1,9,0
keyopt,1,10,0
block,0,1,0,1,0,0.1,
cylind,0,0.1,0,0.1,0,90,
vsbv,1,2
*set,_rc_set,1,
r,1
rmodif,1,1,4,1,0,0
rmodif,1,7,0
rmodif,1,13,1,0,0.025,1,90,0.025,
rmodif,1,19,1,90,0.025,1,0,0.025,
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,0
mpdata,ex,1,,1.25e9
mpdata,ey,1,,3e8
mpdata,ez,1,,3e8
mpdata,prxy,1,,0.25
mpdata,pryz,1,,0.25
mpdata,prxz,1,,0.01
mpdata,gxy,1,,5e7
mpdata,gyz,1,,2e7
mpdata,gxz,1,,5e7
lplot
/view,1,1,1,1
/ang,1
/rep,fast
flst,5,8,4,orde,6
fitem,5,2
fitem,5,-3
fitem,5,6
fitem,5,-7
fitem,5,22
fitem,5,-25
```

```
cm,_y,line
lsel,,,,p51x
cm,_y1,line
cmsel,,_y
lesize,_y1,,,15,,,,,1
flst,5,5,4,orde,4
fitem,5,10
fitem,5,-12
fitem,5,19
fitem,5,-20
cm,_y,line
lsel,,,,p51x
cm,_y1,line
cmsel,,_y
lesize,_y1,,,8,,,,,1
flst,5,2,4,orde,2
fitem,5,15
fitem,5,-16
cm,_y,line
lsel,,,,p51x
cm,_y1,line
cmsel,,_y
lesize,_y1,,,10,,,,,1
cm,_y,volu
vsel,,,,3
cm,_y1,volu
chkmsh,'volu'
cmsel,s,_y
vsweep,_y1
cmdele,_y
cmdele,_y1
cmdele,_y2
finish
/solu
antype,0
nsubst,20,0,0
outres,erase
outres,all,all
autots,0
/status,solu
solve
/user,1
/view,1,-0.353520719585,-0.191055674142,0.915707830152
```

```
/ang,1,-20.5233393591
/replo
flst,2,2,5,orde,2
fitem,2,12
fitem,2,-13
da,p51x,symm
flst,2,1,5,orde,1
fitem,2,9
/go
sfa,p51x,1,pres,-2000
/status,solu
solve
/view,1,1,2,3
/ang,1
/rep,fast
/post1                                    ! 进入后处理器
set,last                                  ! 读入最后子步结果
plns,s,eqv                                ! 应力显示(见图 12-8)
finish
```

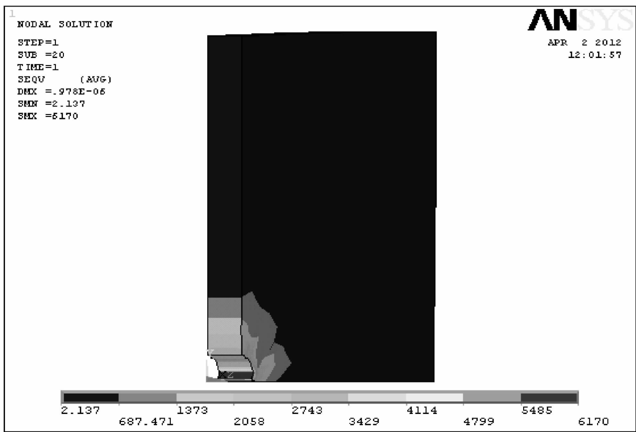


图 12-8　应力分布

12.3　本章总结

通过本章的学习读者可以掌握复合材料的设计规律、复合材料设计分析与有限元方法、ANSYS 软件设计复合材料可选用的单元类型、ANSYS 程序对复合材料分析的步骤、基于 ANSYS 软件的复合材料的设计方法。

12.4　练习题

1）复合材料的定义和特点是什么？复合材料有哪些设计规律？

2）在 ANSYS 软件中是如何设计复合材料的。

3）层合板受压分析。层合板指的是仅仅由纤维强化塑料（FRP）层叠而成的复合板材，中间不包含芯材，板材的性能不仅与纤维的弹性模量、剪切模量有关，还与纤维的铺层方向有着密切关系。本例中的板材由 4 层厚度为 0.025m 的单元板复合而成，单元板的铺层方向为 0°、90°、90°、0°，见图 12-9 所示。单元板的材料属性见表 12-1。

表 12-1 单元板材料属性

E_x/MPa	E_y/MPa	E_z/MPa	G_{xy}/MPa	G_{yz}/MPa	G_{xz}/MPa	PR_{xy}	PR_{yz}	PR_{xz}
12.5	300	300	50	20	50	0.25	0.25	0.01

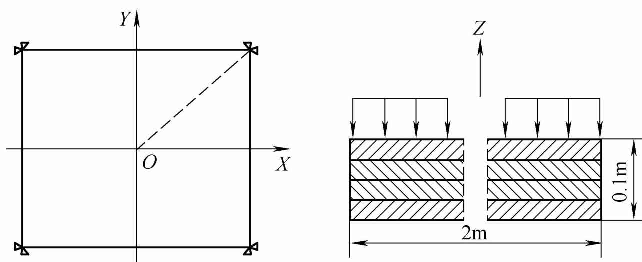


图 12-9 复合材料板

4）正交铺设层合板变形分析，如图 12-10 所示，一块简单支撑方形正交铺设层合板在均匀压力 p_b 作用下，铺设方式对称于板的中面。试确定在载荷作用下板中心沿 Z 方向的变形 δ。

已知条件：$E_x = 25 \times 10^6 \mathrm{N/m^2}$，$E_y = 1 \times 10^6 \mathrm{N/m^2}$，$\nu_{xy} = 0.25$，$G_{xy} = G = 0.5 \times 10^6 \mathrm{N/m^2}$，$G_{yz} = 0.2 \times 10^6 \mathrm{N/m^2}$，$a = 0.1\mathrm{m}$，$h = 0.1\mathrm{m}$，$t = 0.025\mathrm{m}$，载荷 $p_b = 1.0 \mathrm{N/m^2}$。

5）如图 12-11 所示，一块尺寸为 0.4m × 0.6m 的碳纤维复合材料板，AB 端完全固定，C 端受垂直板面的集中力作用，大小为 100N，试对其进行分析。已知复合材料板有 4 层，每层厚度为 0.005m；$E_z = 30 \times 10^6 \mathrm{N/m^2}$，$E_y = E_z = 3 \times 10^6 \mathrm{N/m^2}$，泊松比为 0.3，$G_{xy} = G_{xz} = G_{yz} = 6 \times 10^5 \mathrm{N/m^2}$。

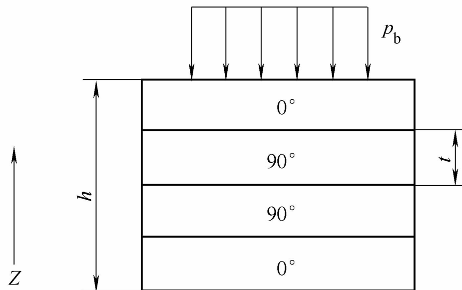


图 12-10 简单支撑方形正交铺设层合板

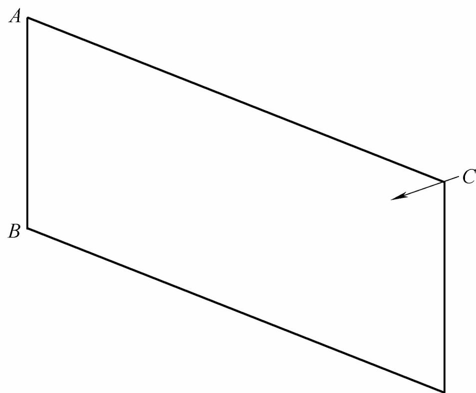


图 12-11 复合材料板

第 13 章　基于 ANSYS 软件的铸造成形数值模拟

13.1　铸件凝固过程数值模拟概况

铸造行业是一个古老而又非常重要的传统行业，无论是在发达国家还是在发展中国家，铸造行业都有着不可替代的地位。铸造过程的计算机模拟仿真技术已成为当今国际公认的制造科学与材料科学的主要前沿领域，也是改造传统铸造产业的必由之路。由于铸件在形成过程中会产生缩孔缩松、热裂纹等，这些缺陷对产品的质量和使用性能具有潜在的危害性，因此长期以来铸件的质量很难得到保证。在实际生产之前对铸件在浇注、凝固过程中可能产生的缺陷采用计算机数值模拟的方法进行有效的预测，从而在浇注前就采取有效对策，以确保铸件的质量，是可行的途径之一。

对铸造过程的流场、温度场等计算的主要目的就是对铸件中可能产生的缩孔缩松进行预测，优化工艺设计，控制铸件内部质量。通过在计算机上进行铸造过程的模拟，可以得到各个阶段铸件温度场、流场、应力场的分布，预测缺陷的产生和位置。对多种工艺方案实施对比，选择最优工艺，能大幅提高产品质量，提高产品成品率。

计算铸造应力的力学模型主要有弹性模型、弹性—蠕变模型、热弹塑性模型和热弹塑性蠕变模型。其中大部分采用了热弹塑性蠕变模型，通过开发有限元软件或借助大型工程有限元软件来模拟、研究材料的高温应力应变行为。现在，人们主要对铸钢、铝硅、铝铜合金等进行热应力场数值模拟，并取得了一些成果。例如人们进行了应力框、中空轴铸钢件、汽轮机缸体等的热应力场的模拟研究。通过研究发现，当合金凝固到液相线温度以下的某一温度，即显示出了强度和应变，随着温度的进一步降低，强度逐渐增加，当达到固相线温度时，强度和应变都急剧增加。如果把合金凝固过程中开始显示强度的温度定义为准固相线，则合金在凝固区间以准固相线为界，可以分为有强度的准固相区和无强度的准液相区。因此铸件凝固过程应力场数值模拟须同时考虑准固相区和固相线以下的温度范围。当温度达到固相线温度以下时，铸件已经凝固结束，此时仅表现为热弹塑性问题。当合金处于准固态时，其强度和延伸率都很低，如果铸件收缩受阻，很容易产生裂纹。但是，合金在准固态的力学行为，尤其是本构方程等方面的数据缺乏，因而建立高温准固相区力学本构方程是进行铸件凝固过程热应力场模拟的关键。

ANSYS 热分析最强大的功能之一就是可以分析相变问题，例如凝固或熔化等。含有相变问题的热分析是一个非线性的瞬态问题，相变问题需要考虑熔融潜热，即在相变过程吸收或释放的热量。

13.2 ANSYS 软件在铸造过程模拟中的应用实例

13.2.1 实例 1—砂型铸造温度场模拟

一钢铸件及其砂型的横截面尺寸如图 13-1 所示，浇注温度为 1579℃，环境及砂型温度为 25℃，材料性能见表 13-1 和表 13-2。

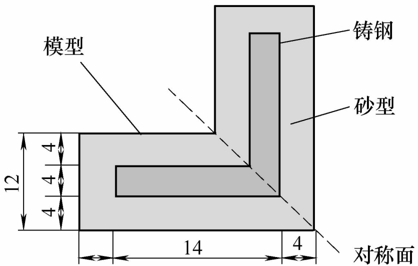


图 13-1 钢铸件及其砂型的横截面尺寸

表 13-1 砂型的热物理性能

热导率(KXX)/[W/(m·K)]	0.025
密度(DENS)/(g/m^3)	0.254
比热容(C)/[J/(kg·K)]	0.28

表 13-2 铸钢的热物理性能

温度/℃	0	2643	2750	2875
热导率/[W/(m·k)]	1.44	1.54	1.22	1.22
焓/(J/m^3)	0	128.1	163.8	174.2

命令流如下：

```
/clear
/title,casting solidification
/filname,ex13 -1,1                    ! 定义工作文件名
/prep7                                ! 进入前处理
et,1,plane55                          ! 定义单元
mp,DENS,1,0.054                       ! 定义砂型热性能
mp,KXX,1,0.025
mp,C,1,0.28
mptemp,1,0,2643,2750,2875             ! 定义铸钢的热性能
mpdata,KXX,2,1.44,1.54,1.22,1.22
mpdata,ENTH,2,0,128.1,163.8,174.2
mpplot,KXX,2
mpplot,ENTH,2
save
k,1,0,0,0                             ! 创建几何模型
k,2,22,0,0
k,3,10,12,0
k,4,0,12,0
/pnum,kp,1
/pnum,line,1
```

```
/pnum,area,1
/triad,ltop
kplot
a,1,2,3,4
save
rectng,4,22,4,8
aplot
aovlap,all
adele,3
aplot
save
esize,1                                ! 划分网格
amesh,5
mat,2
aplot
amesh,4
eplot
/pnum,elem
/number,1
save
/solu                                  ! 进入加载求解
antype,trans                           ! 设定为瞬态分析
esel,s,mat,,2                          ! 设定铸钢的初始温度
nsle,s
/replot
ic,all,temp,1579
esel,inve                              ! 设定砂型的初始温度
nsle,s
/replot
ic,all,temp,20
allsel
save
lplot
sfl,1,conv,0.014,,80                   ! 设定砂型外边界对流
sfl,3,conv,0.014,,80
sfl,4,conv,0.014,,80
/psf,conv,2
time,3                                 ! 设定瞬态分析时间
kbc,1                                  ! 设定为阶跃的载荷
autots,on                              ! 打开自动时间步长
deltim,0.01,0.001,0.25                 ! 设定时间步长
timint,on                              ! 打开时间积分
tintp,,,,1                             ! 将 theta 设定为 1
```

```
outres,all,all                          ! 输入每个子步的结果
solve
/post1                                  ! 进入通用后处理器
set,,, ,,, ,last                        ! 读取最后一步分析结果
plnsol, temp,, 0                        ! 显示焊接件的温度分布(见图 13-2)
finish
```

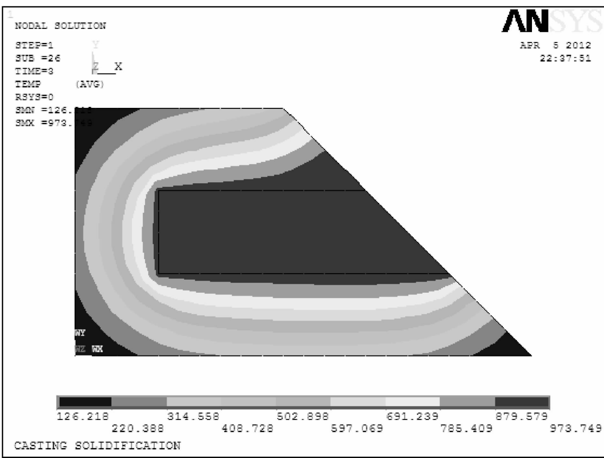


图 13-2 浇注 3s 砂型和铸件的温度场分布

13.2.2 实例 2—铝合金压力铸造凝固过程计算机模拟

图 13-3 为一个铝合金铸件及其压铸型的横截面示意图，铸件和压铸型材料的热性能参数如表 13-3 和表 13-4 所示。铸件的初始温度为 650℃，压铸型的初始温度为 25℃，铝合金密度 2.73g/m^3，周围空气的表面传热系数为 65W/(m^2 · K)。求 200s 后铸件与压铸型的温度场分布及图所示各点的温度随时间变化关系曲线(*B*、*C* 两点在模具上)。

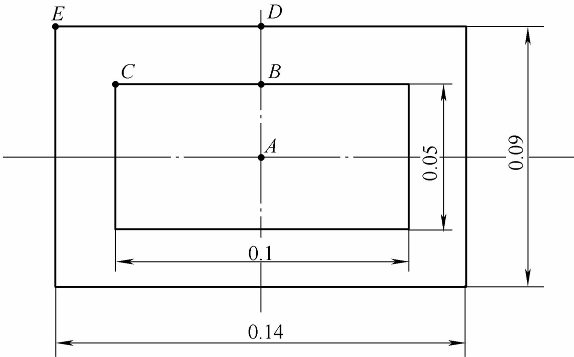


图 13-3 压铸型的型腔示意图

表 13-3 铸件材料热性能参数

温度/℃	热导率 KXX/[W/(m · K)]	温度/℃	比热容 C/[J/(kg · K)]
100	206	100	837
200	215	200	962
300	228	300	1046

（续）

温度/℃	热导率 KXX/[W/(m·K)]	温度/℃	比热容 C/[J/(kg·K)]
400	249	400	1130
530	249	500	1250
800	290	650	1379

表 13-4　压铸型材料热性能参数

热导率/[W/(m·K)]	密度/(kg/m^3)	比热容/[J/(kg·K)]
21	7800	110

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex13 -2                          ! 定义工作文件名
/title,temperature distribution of diecasting solidification
! 定义工作标题
reyw,pr thern,1
/prep7                                    ! 进入前处理器
et,1,plane55                              ! 定义单元类型
mp,DENS,1,7800                            ! 输入密度
mp,KXX,1,21                               ! 输入热导率
mp,C,1,110                                ! 输入比热容
mptemp,1,100,200,300,400,530,800          ! 设置温度点
mpdata,KXX,2,1,206,215,228,249,249,290    ! 输入热导率
mptemp,1,100,200,300,400,500,650          ! 设置温度点
mpdata,C,2,1,837,962,1046,1130,1250,1379  ! 输入焓值
rectng,0,0. 1,0,0. 05                     ! 生成矩形面
rectng, -0. 02,0. 12, -0. 02,0. 07
/pnum,aiea,1                              ! 显示面编号
/replot
aovlap,1,2                                ! 自递加
numcmp,area                               ! 压缩面编号
numcmp,line                               ! 压缩线段编号
esize,0. 005                              ! 定义单元尺寸
mat,2                                     ! 指定材料参考号为 2
amesh,1                                   ! 对面 1 进行网格划分
aplot,all                                 ! 显示面
mat,1                                     ! 指定材料参考号为 1
amezh,2                                   ! 对面 2 进行网格划分
eplot                                     ! 显示单元
finish
/solu                                     ! 进入求解器
antypet trans                             ! 指定分析类型为瞬态分析
```

```
timint,off                                        ! 先做瞬态分析,确定初始条件
time,0.01                                         ! 设置计算终止时间
deltim,0.01                                       ! 设置时间步长
aplot                                             ! 显示面
asel,s,,,1                                        ! 选择面 1
nsla,8,1                                          ! 选择面上所有节点
d,all,temp,650                                    ! 施加温度载荷
allsel
asel,s,,,2                                        ! 选择面 2
nsla,s,1                                          ! 选择面上所有节点
d,all,temp,25                                     ! 施加温度载荷
allsel
lplot,all                                         ! 显示线段
/pnum,line                                        ! 显示线段编号
lsel,s,,,5,8                                      ! 选择线段
nsll,s,1                                          ! 选择线段上的所有节点
sf,all,conv,65,25                                 ! 施加对流载荷
allsel
solve                                             ! 得到初始温度分布
timint,on                                         ! 打开时间积分选项,进行瞬态分析
time,200                                          ! 设置计算终止时间
autots, -1                                        ! 程序选择是否打开自动时间步长
deltim,3,3,10,1                                   ! 设置最大、最小时间步长
kbc,0                                             ! 选择加载方式
ddele,all,temp                                    ! 删除稳态分析中定义的节点温度
outres,all,all
solve                                             ! 开始求解计算
finish
/post1                                            ! 进入 post1 后处理器
set,last                                          ! 读取最终求解结果
/title,temperature distribution of diecasting solidification
plnsol,temp                                       ! 绘制温度场等值线图
esel,s,mat,,1                                     ! 选择材料参考号为 1 的所有单元
nsle,s,1                                          ! 选择单元上的所有节点
plnsol,temp                                       ! 绘制温度场等值线圈
allsel
finish
/post26                                           ! 进入 post26 后处理器
nsel,s,loc,x,0.05                                 ! 选择节点
nsel,r,loc,y,0.025
*get,qa2,node,,num,max                            ! 根据节点坐标读取最大节点编号
nsel,s,loc,x,0.05                                 ! 选择节点
nsel,r,loc,y,0.05
```

```
*get,qa3,node,,num,max              ! 根据节点坐标读取最大节点编号
nsel,s,loc,x,0                      ! 选择节点
nsel,r,loc,y,0.05
*get,qa4,node,,num,max              ! 根据节点坐标读取最大节点编号
nsel,s,loc,x,0.05                   ! 选择节点
nsel,r,loc,y,0.07
*get,qa5,node,,num,max              ! 根据节点坐标读取最大节点编号
nsel,s,loc,x,-0.02                  ! 选择节点
nsel,r,loc,y,0.07
*get,qa6,node,,num,max              ! 根据节点坐标读取最大节点编号
nsol,2,qa2,temp                     ! 定义变量 2
nsol,3,qa3,temp                     ! 定义变量 3
nsol,4,qa4,temp                     ! 定义变量 4
nsol,5,qa5,temp                     ! 定义变量 5
nsol,6,qa6,temp                     ! 定义变量 6
/title, temperature curve and time at point a
plvar,2                             ! 绘制 A 点温度随时间的变化规律曲线
/title, temperature curve and time at point b
plvar,3                             ! 绘制 B 点温度随时间的变化规律曲线
/title, temperature curve and time at point c
plvar,4                             ! 绘制 C 点温度随时间的变化规律曲线
/title, temperature curve and time at point d
plvar,5                             ! 绘制 D 点温度随时间的变化规律曲线
/title, temperature curve and time at point e
plvar,6                             ! 绘制 E 点温度随时间的变化规律曲线
finish
```

分析模拟结果见图 13-4 ~ 图 13-10。

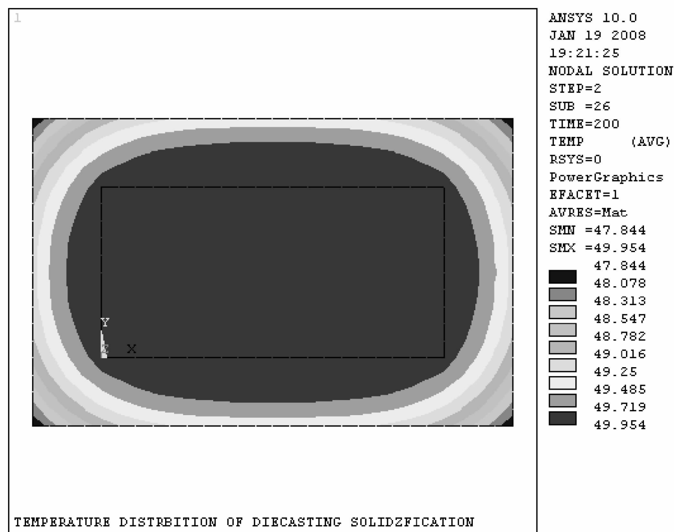


图 13-4　200s 后模具和铸件内部温度场分布等值线图

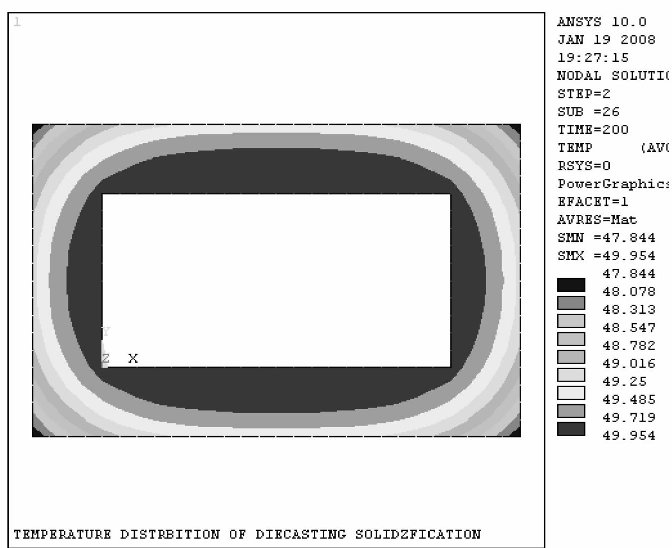


图 13-5　200s 后压铸型内部温度场分布等值线图

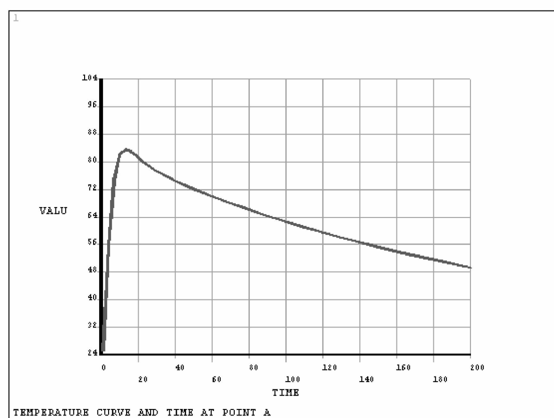


图 13-6　*A* 点温度随时间变化关系曲线图

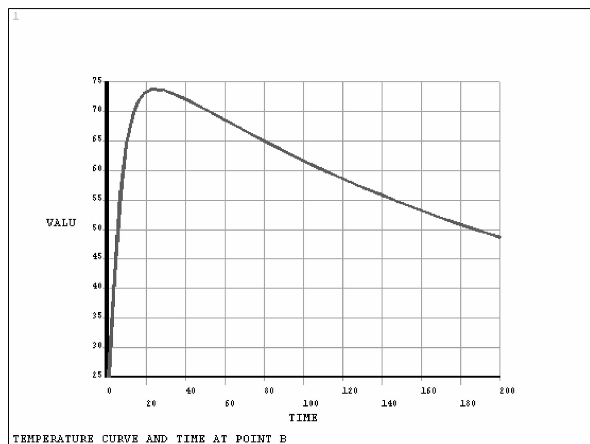


图 13-7　*B* 点温度随时间变化关系曲线图

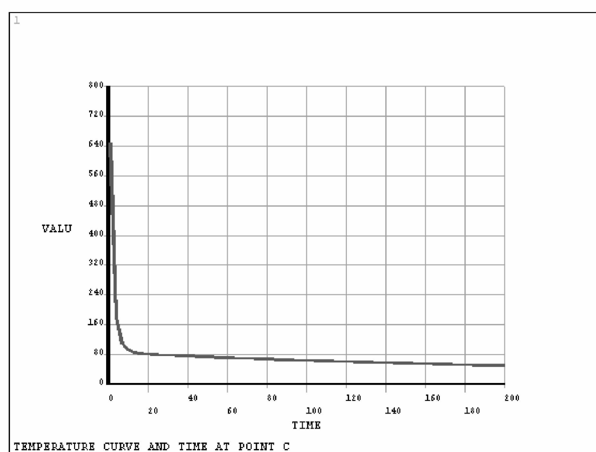


图 13-8　*C* 点温度随时间变化关系曲线图

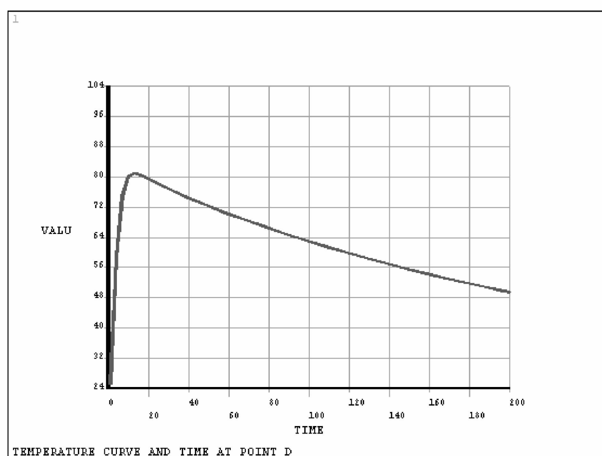


图 13-9　*D* 点温度随时间变化关系曲线图

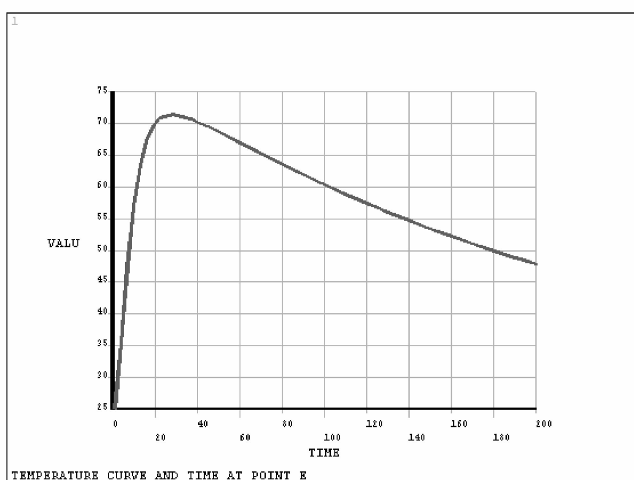


图 13-10　*E* 点温度随时间变化关系曲线图

13.2.3 实例 3—AZ31 镁合金连续铸造冷凝阶段温度场分布及应力场分布

有一用于连续铸造工字形的结晶器，其横截面形状如图 13-11 所示，已知 AZ31 镁合金充满型腔后的初始温度为 670℃，结晶器初始温度为 25℃，铸造速度为 1mm/s，周围空气和冷却水的温度为 25℃，结晶器材料为铜，与 AZ31 的性能参数见表 13-5 ~ 表 13-8。表面传热系数为 454.5 W/(m^2·K)，求连续铸造过程中温度场分布及应力场分布。

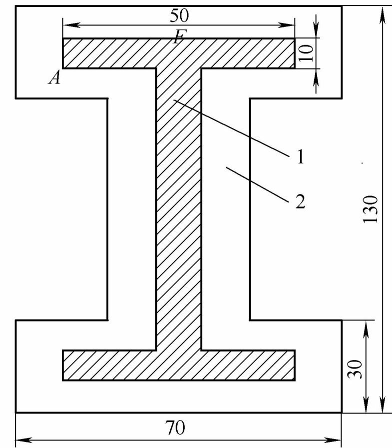


图 13-11 结晶器外形尺寸
1—铸锭截面 2—结晶器截面

表 13-5 铜的性能参数

材料	摄氏温度/℃	弹性模量/Pa	材料密度/(kg/m^3)	泊松比	热导率/[W/(m·K)]	线膨胀系数/(1/K)	比热容/[J/(kg·K)]
铜	30	1.03e11	8900	0.3	3.93	1.66e-5	385
	500	0.84e11					
	1000	0.23e11					
	1500	0.02e11					
	2000	0.002e11					

表 13-6 AZ31 镁合金不同温度下的热导率

温度/℃	20	100	200	300	400	500	600	630	700	800
热导率/[W/(m·K)]	77	87	97	107	117	101	60	58	240	240

表 13-7 AZ31 镁合金不同温度下的比热容

温度/℃	20	100	200	300	400	600	700
比热容/[J/(m·K)]	1020	1020	1100	1150	1220	1400	1400

表 13-8 AZ31 的其他性能参数

密度/(kg/m^3)	弹性模量/MPa	泊松比	线膨胀系数/(1/K)
1780	45000	0.35	26.8e-6

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex13-3
/title,the thermal-stress simulation of direct chill casting
```

```
/prep7
et,1,plane13
keyopt,1,1,4
mp,DENS,1,8900                               ! 输入结晶器的材料性能参数
mp,KXX,1,,3.93
mp,C,1,385
mptemp,,,,,,,,
mptemp,1,30
mptemp,2,500
mptemp,3,1000
mptemp,4,1500
mptemp,5,2000
mpdata,ex,1,,1.03e+011
mpdata,ex,1,,8.4e+010
mpdata,ex,1,,2.3e+010
mpdata,ex,1,,2e+009
mpdata,ex,1,,2e+008
mpdata,ex,1,,2e+008
mpdata,nuxy,1,,0.3
mpdata,nuxy,1,,0.3
mpdata,nuxy,1,,0.3
mpdata,nuxy,1,,0.3
mpdata,nuxy,1,,0.3
mp,alpx,1,1.66e-5
! 输入铸件材料性能参数
mptemp,,,,,,,,                               ! 铸件热导率
mptemp,1,20
mptemp,2,100
mptemp,3,200
mptemp,4,300
mptemp,5,400
mptemp,6,425
mptemp,7,600
mptemp,8,630
mptemp,9,700
mptemp,10,800
mpde,KXX,2
mpdata,KXX,2,,77
mpdata,KXX,2,,87
mpdata,KXX,2,,97
mpdata,KXX,2,,107
mpdata,KXX,2,,117
mpdata,KXX,2,,122
```

```
mpdata,KXX,2,,60
mpdata,KXX,2,,58
mpdata,KXX,2,,240
mpdata,KXX,2,,240
mptemp,,,,,,,,                          ! 铸件比热容
mptemp,1,20
mptemp,2,100
mptemp,3,200
mptemp,4,300
mptemp,5,400
mptemp,6,600
mptemp,7,700
mpde,C,2
mpdata,C,2,,1020
mpdata,C,2,,1020
mpdata,C,2,,1100
mpdata,C,2,,1150
mpdata,C,2,,1220
mpdata,C,2,,1400
mpdata,C,2,,1400
mp,ex,2,45000                           ! 铸件弹性模量
mp,alpx,2,26.8e-6                       ! 铸件线膨胀系数
mp,nuxy,2,0.35                          ! 铸件泊松比
! 几何建模
rectng,0,0.05,0,0.01                    ! 生成矩形面
rectng,0.02,0.03,0.01,0.1
rectng,0,0.05,0.1,0.11
rectng,-0.01,0.06,-0.01,0.02
rectng,0.01,0.04,0.02,0.09
rectng,-0.01,0.06,0.09,0.12
aadd,1,2,3                              ! 面相加操作
aplot,all
aadd,4,5,6
numcmp,area                             ! 压缩面编号
aplot,all
smrtsie,4
mat,2
amesh,1                                 ! 对面进行网格划分
aplot,all                               ! 显示面
mat,1
amesh,2
nummrg,node                             ! 合并相同节点
numcmp,line                             ! 压缩线段数
```

```
numcmp,node                          ! 压缩节点数
save
lplot,all                            ! 显示线段
/pnum,line
lsel,s,line,,3,9,2
lsel,a,line,,13,20
sfl,all,conv,454.5,,25               ! 施加对流边界条件
allsel
save
finish
/solu                                ! 进入求解器
antype,trans
timint,off                           ! 进行稳态分析,确定初始条件
time,0.01
deltim,0.01
asel,s,,,1
nsla,s,1
d,all,temp,700                       ! 施加温度载荷
allsel
asel,s,,,2
nsll,s,1
d,all,temp,25                        ! 施加温度载荷
allsel
lsel,s,,,21
nsll,s,1
d,all,uy
allsel
solve                                ! 得到初始温度分布
timint,on                            ! 进行瞬态分析
time,120                             ! 设置计算终止时间
autots,-1
deltim,1,0.1,25,1
kbc,0
ddele,all,temp                       ! 删除稳态分析中定义的节点温度
outres,all,all
solve
finish
/post1                               ! 进入 post1 后处理器
set,first
plnsol,temp                          ! 显示初始温度场分布
set,next
plnsol,temp                          ! 显示 1s 温度场分布
set,,,,,1
```

```
plnsol,temp                                   ! 显示 60s 温度场分布
set,last
plnsol,temp                                   ! 显示 120s 温度场分布
esel,s,mat,,1
nsle,s,1
plnsol,s,x
plnsol,s,y
plnsol,s,z
plnsol,s,eqv                                  ! 显示模具内部等效应力场分布
plnsol,epto,x
plnsol,epto,y
plnsol,epto,z
plnsol,epto,eqv                               ! 显示模具内部等效应变场分布
allsel
finish
```

13.2.4 实例 4—镁合金薄板快速铸轧有限元仿真研究

图 13-12 是镁合金快速铸轧过程铸轧区示意图，在铸轧过程中，金属液经过铸嘴流到铸轧区后，与轧辊发生强换热并结晶，在向轧辊出口处运动的过程中凝固并被轧制成形，在铸轧区金属存在液态、半固态、固态三种形态。由于铸轧过程铸坯发生了复杂的物理化学变化，加工所获得的板坯的质量与金属液的流动、传热、结晶等有关。镁合金薄板快速铸轧过程中的温度场及应力场的数值模拟是一个较为复杂的过程，它涉及流体力学、传热学、计算方法、偏微分方程的数学理论和铸轧工艺理论等。为了简化铸轧过程温度场和热应力场的计算，作以下几点简化和假设。

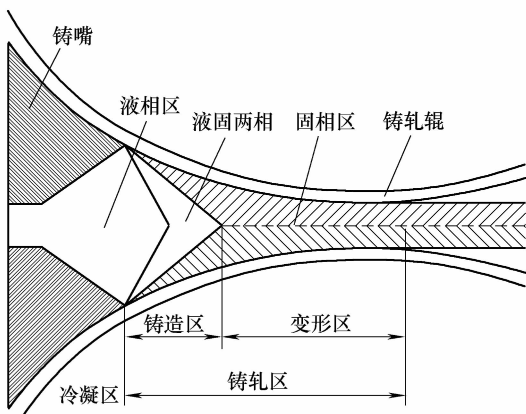


图 13-12　镁合金快速铸轧示意图

1）因铸坯宽度方向的尺寸(一般为可以在铸轧机上调节,可以最宽达到 1 ~ 1.5m)远大于铸轧区长度(66mm)与板坯厚度(10 mm)，因此忽略板坯宽度方向的传热，这样可以把板坯三维传热问题简化为铸轧区板坯纵截面的传热问题，即用二维模型仿真来分析三维问题(见图 13-13)。

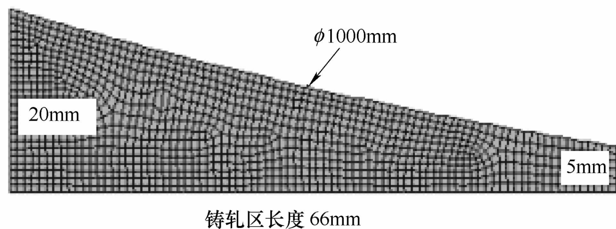


图 13-13　几何模型尺寸与有限元网格划分

2）熔融金属在凝固过程中存在凝固潜热的释放，对于 AZ31 镁合金，假定其凝固潜热在凝固温度区间内均匀释放。

3）轧辊直径(1m)远大于铸轧区长度(66mm)，因此假定轧辊与铸坯的接触界面为直线，铸坯内部各截面金属流动速度按照体积不变原理确定。

4）忽略摩擦及塑性变形功对快速铸轧过程温度场的影响，因摩擦和轧制的塑性变形热与镁液本身带入的热量相比数量级很小。

5）假设铸轧固相区与辊面紧密接触，假设轧辊在工作中不变形且匀速运动。

忽略辊套外表面与环境的辐射对铸轧区温度场的影响。铸轧过程中轧辊的传热包括热对流和热辐射同时存在的复杂凝固传热问题。辐射传热系数可用式(13-1)表示：

$$h_{\mathrm{rad}} = \varepsilon\sigma_0\varphi_{1.2}(T_w^{\ 2} + T_f^{\ 2})(T_w + T_f) \tag{13-1}$$

式中，T_f为环境温度；ε 为全辐射系数，轧辊由不锈钢制成，ε 为 0.65；σ_0为斯蒂芬—玻耳兹曼常数(5.76×10^{-8} W/($\mathrm{m^2}\cdot\mathrm{K^4}$))；$\varphi_{1,2}$为角系数，这时取为 1；按照铸轧过程中实测辊表面平均温度 T_w约为 80℃；环境温度为 T_f为 20℃；可以得到 $h_{\mathrm{rad}}=1.21$W/($\mathrm{m^2}\cdot\mathrm{K}$)。因此辊套外表面与环境的辐射换热很小，可以忽略不计。在本文中铸轧区的传热方式主要为辊/板间热对流，对一个稳定的铸轧过程来说假定表面传热系数保持不变。

对凝固潜热的处理采用等价比热容法，即将潜热折合成比热容，与铸坯材料的比热容相加作为等价比热容，见式(13-2)。

$$c_e = c_{\mathrm{L}} + \frac{L}{T_{\mathrm{L}} - T_{\mathrm{S}}} \tag{13-2}$$

式中，c_e为等价比热容；c_{L}为液态比热容；L 为凝固潜热；T_{L}、T_{S}分别为液相线、固相线温度。

铸轧机主要的结构参数及铸轧工艺条件如表 13-9 所示。在建立几何模型和有限元模型之前选择 ANSYS 软件中的 PLANE13 热—结构耦合对称单元并选择单元的自由度。分析镁合金快速铸轧的工艺特点可知，板坯厚度尺寸远小于板坯宽度尺寸。沿铸坯对称中心取其一半进行研究，同时由于轧制变形都是上下对称的，故只选取板坯的上半部分来建模。采用自由网格划分方法确定网格的形状，并应用 Smart-Sizing 算法确定单元的大小。Smart-Sizing 算法首先对待划分网格面的所有线估算单元边长，然后对几何体中的弯曲和接近区域的线进行细化。由于所有的线和面在网格划分开始时已指定大小，生成网格的质量与待划分网格的面或体的顺序无关，可以生成合理的单元形状，提高计算的精度。1/2 板坯的有限元网格主要是由规则的小正方形和少量的不规则四边形组成。

表 13-9　铸轧机主要参数及铸轧条件

参数	数值
轧辊宽度/m	1
轧辊直径/m	1
板坯厚度/m	0.01
浇注温度/℃	690，660，640
铸轧速度/(m/min)	8，12，15
表面传热系数/[W/($\mathrm{m^2}\cdot\mathrm{K}$)]	10000，12000，15000

AZ31 镁合金的密度为 1780kg/m^3，AZ31 镁合金不同温度下的热导率见表 13-10，由式(13-2)计算的 AZ31 镁合金不同温度下的等效比热值见表 13-11。

表 13-10　AZ31 镁合金不同温度下的热导率

温度/℃	20	100	200	300	566	600	632	700	800
热导率/[W/(m·K)]	77	87	97	107	90	73	75	78	78

表 13-11　AZ31 镁合金不同温度下的等效比热容

温度/℃	20	100	200	400	600	700
比热容/[J/(kg·K)]	4665.2	4665.2	4745.2	4865.2	5045.2	5045.2

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex13-4,1                                  ! 定义工作文件名
/title,rolling casting solidification
/prep7
et,1,plane13
keyopt,1,1,4
mp,DENS,1,8900                                     ! 输入铸件材料性能参数
mp,KXX,1,3.93
mp,C,1,385
mptemp,1,30,500,1000,1500,2000
mp,ex,1,1.03e11,0.84e11,0.23e11,0.02e11,0.002e11
mp,alpx,1,1.66e-5
mp,nuxy,1,0.3
mptemp,1,0,20,100,200,300,400,425,500,566,600,630,700,800
mpdata,KXX,2,1,77,87,97,107,117,122,101,90,60,58,240,240
mptemp,1,0,20,100,200,300,400,600,700
mpdata,C,2,1,1020,1020,1100,1150,1220,1400,1400
mp,ex,2,45000
mp,alpx,2,26.8e-6
mp,nuxy,2,0.35
…
aplot,all
smrtsie,4
mat,1
amesh,1
lplot,all                                          ! 显示线段
/pnum,line
lsel,s,line,,2,5,1
sfl,all,conv,10000,,25                             ! 施加对流边界条件
allsel
```

```
save
finish
/solu                                        ! 进入求解器
antype,trans
timint,off                                   ! 进行稳态分析,确定初始条件
time,0.01
deltim,0.01
asel,s,,,1
nsla,s,1
d,all,temp,690                               ! 施加温度载荷
allsel
lsel,s,,,1
nsll,s,1
d,all,uy
allsel
solve                                        ! 得到初始温度分布
timint,on                                    ! 进行瞬态分析
time,2                                       ! 设置计算终止时间
autots,-1
deltim,0.2,0.2,0.25,1
kbc,0
ddele,all,temp                               ! 删除稳态分析中定义的节点温度
outres,all,all
solve
finish
/post1                                       ! 进入 post1 后处理器
set,last
plnsol,temp                                  ! 显示 120s 温度场分布
finish
```

当铸轧速度为 8m/min，辊/板间表面传热系数为 10000W/(m^2·K)时，改变浇注温度，其他参数保持不变，仿真分析结果如图 13-14 所示。由图可知，在其他条件保持不变的情况下，随着浇注温度的增加，铸坯出口温度升高。当浇注温度从 640℃增加到 690℃时，铸坯表面出口温度从 456℃增加到 488℃。从图 13-14a、图 13-14b、图 13-14c 中可以看出：铸坯温度从入口到出口逐渐降低，从铸坯表层到中心层逐渐升高，随着浇注温度的升高，铸轧区内液穴长度变大，轧辊咬入端附近两相区凝固壳变薄，板坯各处的温度升高。

当铸轧速度为 8m/min 时，为研究辊/板接触界面系数对板坯温度分布的影响，将辊/板接触界面的表面传热系数分别设为不同的恒定值 12000W/(m^2·K)，15000W/(m^2·K)，浇注温度为 640℃。仿真分析结果如图 13-15 所示。可以看出，在其他条件保持不变的情况下，随着表面传热系数的增加，铸坯出口温度降低。当表面传热系数为 10000W/（m^2·K）时，铸坯出口温度约为 443℃；当表面传热系数增大到 12000W/(m^2·K)时，铸坯出口温度降至 415℃；当表面传热系数增大至 15000W/(m^2·K) 时，铸坯出口温度为 384℃。

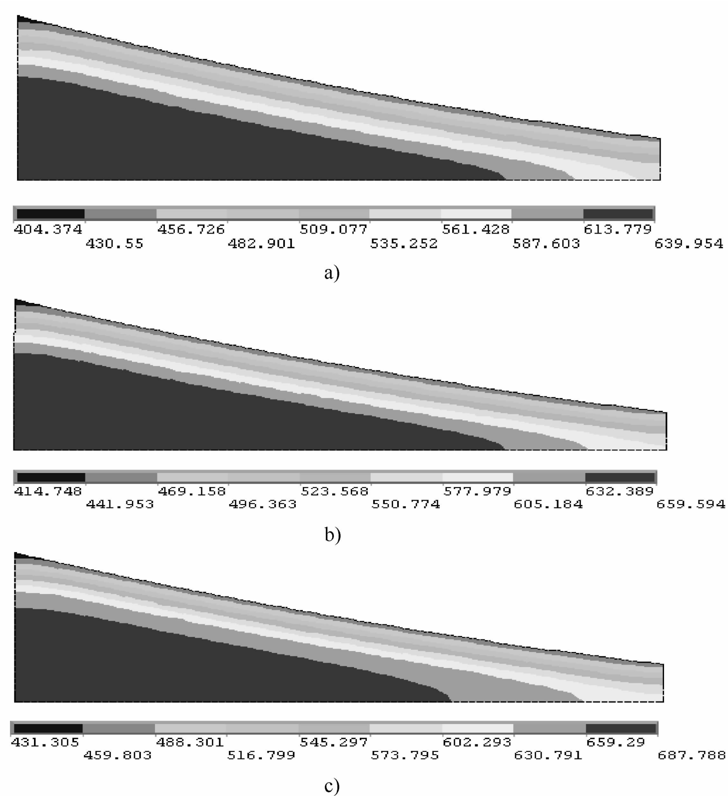


图 13-14　不同浇注温度下连续铸轧过程温度场分布

a）640℃　b）660℃　c）690℃

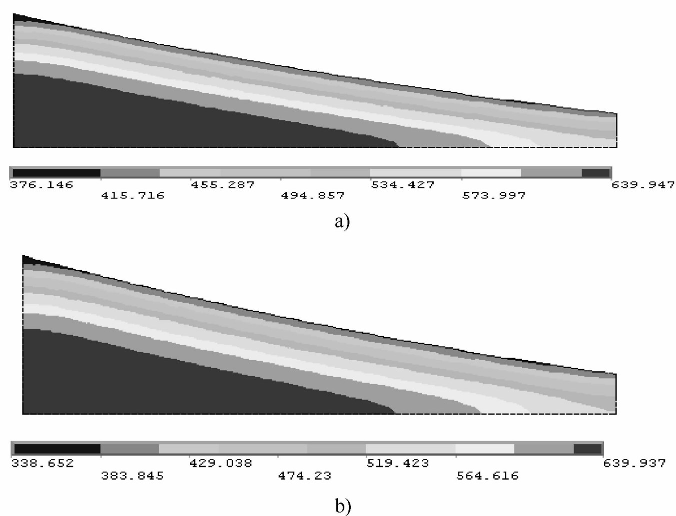


图 13-15　不同换热系数下温度场分布

a）12000W/(m^2·K)　b）15000 W/(m^2·K)

13.2.5　实例 5—某合金浇注过程的温度场模拟



图 13-16　模具和熔体

某合金的浇注过程(见图 13-16)温度场模拟，环境温度为 70℃，浇注温度为 600℃，计算结果应是：最低温度不低于 70℃，最高温度不高于 600℃。如果划分的网格不适当，则会出现最低温度低于 70℃或最高温度高于 600℃的情况，因此必须细化网格并选择 THETA = 1。

命令流如下：

```
/clear
/filname,ex13 -5,1                    ! 定义工作文件名
/prep7
et,1,55                               ! 选择单元
et,2,55
KXX,1,1.99/3600                       ! 热导率
DENS,1,0.00073                        ! 密度
C,1,0.100                             ! 热容
KXX,2,7.38e -6
DENS,2,9.35e -5
C,2,1
k,1, -.5, -.5                         ! 关键点
k,4,6, -.5
k,12
k,13,5.5
k,21, -.5,6
k,22,,6
k,23,5.5,6
k,24,6,6
a,12,13,23,22                         ! 面
a,1,12,22,21
a,1,4,13,12
a,4,24,23,13
lsel,s,,,5,6
lsel,a,,,9,11,2
lesize,all,,,8                        ! 划分网格
lsel,all
lesize,all,,,20
asel,s,,,1
aatt,2,2,2
asel,all
amesh,all
finish
/solu                                 ! 求解
```

```
antype,tran                                    ! 瞬态
timint,off
lsel,s,,,7,8
lsel,a,,,10
nsll,s
sf,all,conv,100,70                             ! 对流传热
alls
esel,s,type,,2
nropt,full
ekill,all
alls
tunif,100
time,1                                         ! 浇注时间
outres,all,all
solve
dtop =0
tim =1
delt =.05
timint,on
tintp,,,,1
*do,ii,1,20                                    ! 生死单元
ddele,all,temp                                 ! 熔体生长
esel,s,type,,2
nsle,s
tim = tim + delt
time,tim
dtop = dtop +.3
nsel,r,loc,y,0,dtop
esln,s,1
ealive,all
nsel,r,loc,y,dtop
esln,s
nsle,s,1
d,all,temp,600
esel,s,live
nall
eall
solve
*enddo
finish
/show,tmpplt,f33
/post1                                         ! 后处理
dtop =0
```

```
*do,ii,2,21                                    ! 杀死单元
set,ii
dtop = dtop +.3
nsel,r,loc,y,0,dtop
esln,s,1
esel,a,type,,1
nall
plns,temp                                      ! 温度场(见图 13-17)
*enddo
finish
```

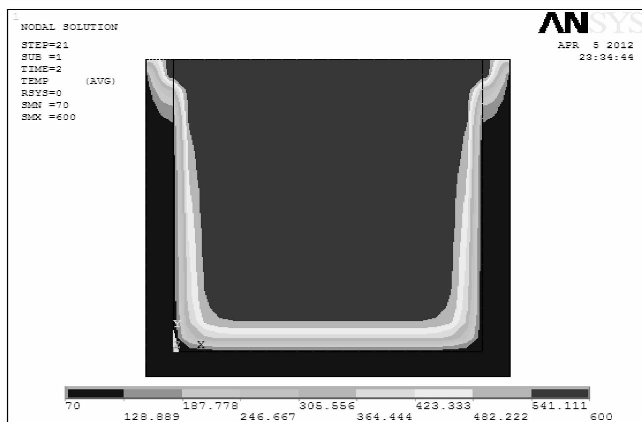


图 13-17　浇注 2s 后的温度场

主要问题：在进行瞬态温度分析时，我们常遇到的一个问题是温度结果明显不合理，计算得到的温度高于给定的最高温度或低于给定的最低温度。造成这种结果的原因有两个：①单元不合理，网格太大；②时间积分方法不恰当。针对上述两个原因，我们采取的措施是：①细化网格；②选择向后积分法(THETA =1)。单元死活：应用单元死活进行分析时，需要用到多个载荷步。在不同的载荷步之间单元的死活状态不同。

13.3　本章总结

通过本章的学习读者可以掌握铸造工艺计算机模拟的基本知识，利用 ANSYS 软件进行铸造过程温度场和应力场的模拟和分析的步骤。

13.4　练习题

1）如图 13-18 所示，铝制飞轮的铸造过程作相变分析，飞轮是将熔解的铝注入砂型中制造的。研究飞轮凝固过程。部件在圆柱形砂型(高 20cm，半径 25cm)中间。铝在 750℃时注入砂型。砂型初始温度为 25℃。模型顶面和侧面与砂型通过自由对流交换热量。环境温度为 30℃，侧面表面传热

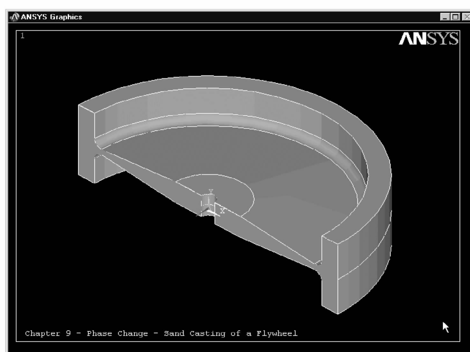


图 13-18　铝制飞轮

系数为 7.5W/(m^2·K)，顶面表面传热系数为 5.75W/(m^2·K)。铸造模型为轴对称。砂的热材料特性假设为均匀，铝的热导率随时间变化，见表 13-12。砂型特性(常数)：

热导率： 0.346W/(m·K)

密度： 1520kg/m^3

比热容： 816J/(kg·K)

表 13-12 铝的热导率

温度/℃	KXX/[W/(m·K)]	温度/℃	KXX/[W/(m·K)]
100	206	400	249
200	215	530	249
300	228	800	290

2）如图 13-19 所示，钢桶在 3s 内浇注完成，砂型尺寸 R_1 = 5mm，R_2 = 11mm，R_3 = 14mm，R_4 = 20mm，求浇注过程中铸钢件与砂型的温度分布。砂的材料特性：热导率 K = 0.025W/(m·K)，密度 DENS = 0.054kg/m^3，比热容 C = 0.28J/(kg·K)。钢的材料特性见表 13-13。初始条件：钢的温度为 1700℃，砂的温度为 25℃。表面传热系数为 0.014W/(m^2·K)，环境温度为 25℃。

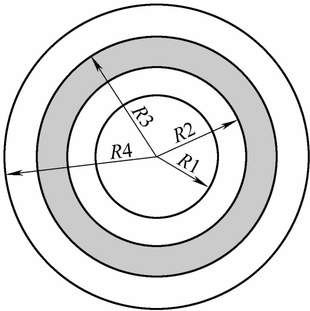


图 13-19 砂型和钢桶的截面示意图

表 13-13 钢的材料特性

温度/℃	0	2643	2750	2875
热导率/[W/(m·K)]	1.44	1.54	1.22	1.22
焓/(J/m^3)	0.0	128.1	163.8	174.2

附　　录

1. 温度场中的单位

项目	国际单位	英制单位	ANSYS 代号
长度	m	ft	
时间	s	s	
质量	kg	lb	
温度	℃	℉	
力	N	lbf	
能量(热量)	J	Btu	
功率(热流率)	W	Btu/s	
热流密度	W/m^2	$Btu/(s \cdot ft^2)$	
生热速率	W/m^3	$Btu/(s \cdot ft^3)$	
热导率	W/(m・K)	Btu/(s・ft・℉)	KXX
表面传热系数	$W/(m^2 \cdot K)$	$Btu/(s \cdot ft^2 \cdot ℉)$	HF
密度	kg/m^3	lb/ft^3	DENS
比热容	J/(kg・K)	Btu/(lb・℉)	C
焓	J/m^3	Btu/ft^3	ENTH

2. 稳态温度场分析的单元

热分析涉及的单元有大约 40 种，其中纯粹用于热分析的有 14 种：

线性单元：LINK32　　二维二节点热传导单元
LINK33　　三维二节点热传导单元
LINK34　　二节点热对流单元
LINK31　　二节点热辐射单元

二维实体单元：PLANE55　　四节点四边形单元
PLANE77　　八节点四边形单元
PLANE35　　三节点三角形单元
PLANE75　　四节点轴对称单元
PLANE78　　八节点轴对称单元

三维实体单元：SOLID87　　六节点四面体单元
SOLID70　　八节点六面体单元
SOLID90　　二十节点六面体单元

壳单元：SHELL57　　四节点

点单元：MASS71

3. 常用材料的弹性模量及泊松比

名称	弹性模量 E/GPa	切变模量 G/GPa	泊松比 μ
灰铸铁、白口铸铁	115~160	45	0.23~0.27
球墨铸铁	151~160	61	0.25~0.29
碳钢	200~220	81	0.24-0.28
合金钢	210	81	0.25~0.3
铸钢	175	70-84	0.25~0.29
轧制磷青铜	115	42	0.32~0.35
轧制锰黄铜	110	40	0.35
铸铝青铜	105	42	0.25
硬铝合金	71	27	—
冷拔黄铜	91~99	35-37	0.32~0.42
轧制纯铜	110	40	0.31~0.34
轧制锌	84	32	0.27
轧制铝	69	26-27	0.32~0.36
铅	17	7	0.42
钢	207	—	0.29
铝	71.7	—	0.33
铸铁	100	—	0.211
不锈钢	190	—	0.305
镁	44.8	—	0.35
镍	207	—	0.291
玻璃	46.2	—	0.245
黄铜	106	—	0.324
铜	119	—	0.326
石墨	36.5	—	0.425
钛	102.04	—	0.3
钨	344.7	—	0.28
木材	11	—	0.33

4. 铝合金的典型物理性能

铝合金牌号及状态	热膨胀系数(20~100℃)/(10^{-6}/℃)	熔点范围/℃	热导率/[W/(m·K)]	比热容/[J/(kg·K)]	密度(20℃)/(g/cm^3)
2024-T351	21.1	502~638	121	875	2.82
5052-H112	23.8	605~650	138	900	2.72
5083-H112	24.2	574~638	117	900	2.72
6061-T651	23.6	582~652	167	896	2.73
7075-T651	23.4	477~635	130	960	2.82
Fortal-T651	23.5	475~635	134~153	857	2.83
Alumold-1-T651	23.7	475~630	153	857	2.84
Alumold-3-T851	22.3	545~645	130	920	2.86

参 考 文 献

[1] 陈晓霞. ANSYS7.0 高级分析[M]. 北京：机械工业出版社，2004.
[2] 张朝晖. ANSYS8.0 热分析教程与实例解析[M]. 北京：中国铁道出版社，2005.
[3] 盛和太. ANSYS 有限元原理与工程应用实例大全[M]. 北京：清华大学出版社，2006.
[4] 余伟炜. ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.
[5] 王呼佳. ANSYS 工程分析进阶实例[M]. 北京：中国水利水电出版社，2005.
[6] 张朝晖. ANSYS 工程应用范例入门与提高[M]. 北京：清华大学出版社，2004.
[7] 辛启斌. 材料成形计算机模拟[M]. 北京：冶金工业出版社，2004.
[8] 商跃进. 有限元原理与 ANSYS 应用指南[M]. 北京：清华大学出版社，2005.
[9] 许光明. ANSYS 基础及其在工程上的应用[M]. 沈阳：东北大学出版社，2002.
[10] 董湘怀. 材料成形计算机模拟[M]. 北京：机械工业出版社，2003.
[11] 龚曙光. ANSYS 工程应用实例解析[M]. 北京：机械工业出版社，2003.
[12] 王富耻. ANSYS10.0 有限元分析理论与工程应用[M]. 北京：电子工业出版社，2006.
[13] 祝效华. ANSYS 高级工程有限元分析范例精选[M]. 北京：电子工业出版社，2004.
[14] 王建江. ANSYS11.0 结构与热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京：机械工业出版社，2008.
[15] 张国智，胡仁喜，陈继刚. ANSYS10.0 热力学有限元分析实例指导教程[M]. 北京：机械工业出版社，2008.
[16] 阚前华，谭长建，张娟，等. ANSYS 高级工程应用实例分析与二次开发[M]. 北京：电子工业出版社，2006.
[17] 许洋，党沙沙，胡仁喜，等. ANSYS11.0/FLOTRAN 流场分析实例指导教程[M]. 北京：机械工业出版社，2009.
[18] 曾攀. 有限元基础教程[M]. 北京：高等教育出版社，2009.
[19] 高耀东，刘学杰. 机械工程应用精华 50 例[M]. 北京：电子工业出版社，2011.

ANSYS在材料工程中的应用

★本书结合基本物理场数值模拟的理论基础与大量实例，全面系统地介绍了材料加工成形过程中基于ANSYS的数值模拟技术

★本书实例涉及铸造、焊接、锻压、热处理、喷涂、失效分析、复合材料设计、电子元件设计领域，包括温度场、应力场、流场、电磁场的多场的数值模拟与应用。

★本书在每章后提供了习题，可以通过改变问题的求解条件，分析评价计算结果的正确性和准确性，以达到举一反三的目的。

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术/工程软件/ANSYS

ISBN 978-7-111-40289-3
策划编辑◎孔劲



定价：48.00元